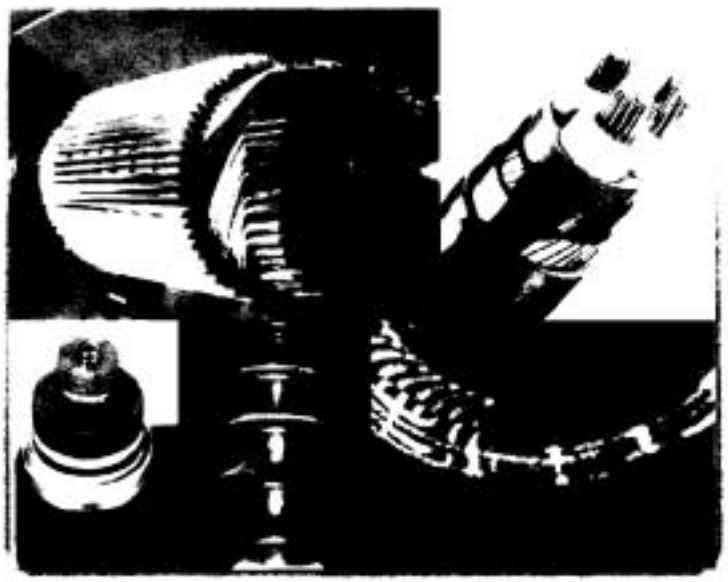
LAURENŢIU MARIUS DUMITRAN

SISTEME DE IZOLAŢIE ELECTRICĂ



Editura PRINTECH

Laurenţiu Marius DUMITRAN

SISTEME DE IZOLAŢIE ELECTRICĂ

Editura Printech
2008

CUPRINS

1. Structura şi componentele sistemelor de izolaţie 13

1.1. Locul şi rolul sistemelor de izolaţie 13

1.2. Funcţiile şi solicitările sistemelor de izolaţie 15

1.3. Componentele sistemelor de izolaţie 16

1.3.1. Clasificarea în funcţie de starea de agregare 17

1.3.2. Clasificarea după domeniul de utilizare 18

1.3.3. Clasificarea după compoziţia chimică 18

1.3.4. Clasificarea după stabilitatea termică 20

1.4. Sistemele de izolaţie ale echipamentelor electrice 23

1.4.1. Transformatoare electrice 23

1.4.2. Motoare şi generatoare electrice 32

1.4.2.1. Sistemele de izolaţie ale înfăşurărilor statorice 34

1.4.2.2. Sistemele de izolaţie ale înfăşurărilor rotorice 44

1.4.3. Cabluri de energie 47

1.4.3.1. Cabluri cu izolaţie hârtie-ulei 48

1.4.3.2. Cabluri cu izolaţie extrudată 54

1.4.3.3. Cabluri supraconductoare 59

1.4.3.4. Accesorii pentru cabluri 64

1.4.4. Izolatoare electrice 68

1.4.4.1. Izolatoare pentru liniile electrice aeriene (LEA) 69

1.4.4.2. Izolatoare compozite 76

1.4.4.3. Izolatoare de trecere 79

2. Fenomene asociate câmpului electric în sistemele de izolaţie 85

2.1. Noţiuni generale 85

2.2. Curenţii de absorbţie/resorbţie 85

2.3. Conducţia electrică 89

2.3.1. Fenomene care se produc la interfaţa metal-izolant 90

2.3.1.1. Injecţia Schottky 92
2.3.1.2. Injecţia Fowler-Nordheim 96
2.3.2. Conducţia electrică a gazelor 99
2.3.2.1. Cazul câmpurilor electrice slabe 100
2.3.2.2. Cazul câmpurilor electrice intense 102
2.3.2.3. Cazul câmpurilor electrice foarte intense 103
2.3.3. Conducţia electrică a lichidelor electroizolante 103
2.3.3.1. Efectul câmpului electric asupra proceselor de disociere 107
2.3.3.2. Fenomene specifice interfeţei metal-lichid 108
2.3.3.3. Curentul datorat particulelor aflate în suspensie 110
2.3.4. Conducţia electrică a izolatorilor solizi 111
2.3.4.1. Cazul câmpurilor electrice slabe 112
2.3.4.2. Cazul câmpurilor electrice intense 116
2.4. Polarizarea electrică 128
2.4.1. Polarizarea în câmpuri electrice invariabile în timp 130
2.4.1.1. Polarizarea de deformare electronică 130
2.4.1.2. Polarizarea de deformare ionică 131
2.4.1.3. Polarizaţia de orientare 132
2.4.1.4. Polarizaţia de neomogenitate 134
2.4.2. Polarizarea în câmpuri electrice variabile în timp 134
2.4.2.1. Polarizarea de deformare în câmpuri armonice 136
2.4.2.2. Polarizarea de orientare 138
2.4.2.3. Polarizarea de neomogenitate 142

3. Străpungerea sistemelor de izolaţie 147
3.1. Noţiuni generale 147
3.2. Străpungerea gazelor 148
3.3. Străpungerea lichidelor 154
3.3.1. Teorii ale străpungerii lichidelor 157
3.3.1.1. Teorii bazate pe ionizarea moleculelor 158
3.3.1.2. Străpungerea termică 160
3.3.1.3. Teoria bulelor 160

3.3.1.4. Teoria particulelor..... 161
3.4. Străpungerea sistemelor de izolaţie solide..... 162
3.4.1. Străpungerea termică..... 164
3.4.2. Străpungerea electronică..... 166
3.4.2.1. Străpungerea intrinsecă..... 166
3.4.2.2. Străpungerea prin avalanşă..... 168
3.4.3. Străpungerea electromecanică..... 170
3.4.4. Străpungerea în câmpuri electrice neuniforme..... 172
3.4.5. Străpungerea izolaţiei stratificate..... 173

4. Îmbătrânirea sistemelor de izolaţiilor..... 175
4.1. Fenomene fizico-chimice de îmbătrânire a izolaţiilor..... 175
4.2. Îmbătrânirea izolaţiilor sub acţiunea câmpului electric..... 178
4.2.1. Descărcări parţiale în sistemele de izolaţie..... 178
4.2.1.1. Noţiuni generale..... 178
4.2.1.2. Calculul pierderilor corespunzătoare DP..... 183
4.2.1.3. Detectarea şi măsurarea nivelului DP..... 186
4.2.2. Arborescenţe electrice şi electrochimice..... 195
4.2.2.1. Arborescenţe electrice..... 196
4.2.2.2. Arborescenţe de apă..... 198

5. Metode de încercare şi de determinare a duratei de viaţă a sistemelor de izolaţie..... 207
5.1. Încercările sistemelor de izolaţie..... 207
5.1.1. Tipuri de încercări..... 207
5.1.1.1. Încercări de control al dimensionării..... 208
5.1.1.2. Încercări de simulare a condiţiilor de funcţionare..... 209
5.2. Determinarea duratei de viaţă a sistemelor de izolaţie..... 211
5.2.1. Determinarea duratei de viaţă termică..... 212
5.2.1.1. Aplicaţie numerică. Calculul mărimilor caracteristice procesului de îmbătrânire a izolaţiei unui transformator.... 218
5.2.2. Determinarea duratei de viaţă electrică..... 222

5.2.3. Determinarea duratei de viaţă mecanică..... 223
5.2.4. Determinarea duratei de viaţă în cazul solicitărilor combinate. 223

6. Diagnosticarea stărilor sistemelor de izolaţie..... 225
6.1. Noţiuni generale..... 225
6.2. Metode şi factori de diagnostic..... 226
6.2.1. Măsurarea parametrilor electrici..... 227
6.2.1.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie..... 227
6.2.1.2. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice, a capacităţii electrice şi permitivităţii relative..... 228
6.2.1.3. Măsurarea rigidităţii dielectrice. Încercări la tensiune mărită..... 234
6.2.1.4. Metode pentru măsurarea nivelului descărcărilor parţiale.. 240
6.3. Evaluarea stărilor izolaţiilor transformatoarelor electrice şi bobinelor de reactanţă..... 241
6.3.1. Determinarea stărilor izolaţiilor transformatoarelor şi autotransformatoarelor de putere..... 242
6.3.1.1. Determinarea proprietăţilor dielectrice ale uleiului..... 242
6.3.1.2. Măsurarea rezistenţei de izolaţie..... 243
6.3.1.3. Măsurarea factorului de pierderi..... 244
6.3.1.4. Încercarea cu tensiune alternativă mărită..... 244
6.3.1.5. Încercarea cu impulsuri de tensiune..... 245
6.3.1.6. Măsurarea nivelului descărcărilor parţiale..... 245
6.3.2. Determinarea stărilor izolaţiilor bobinelor..... 246
6.3.2.1. Determinarea proprietăţilor dielectrice ale uleiului..... 246
6.3.2.2. Măsurarea rezistenţei de izolaţie..... 246
6.3.2.3. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice..... 247
6.3.2.4. Încercarea cu tensiune alternativă mărită..... 247
6.4. Diagnosticarea stărilor izolaţiilor generatoarelor şi motoarelor electrice..... 247
6.4.1. Generatoare sincrone..... 247
6.4.1.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie..... 248

6.4.1.2. Încercarea cu tensiune alternativă mărită..... 249
6.4.1.3. Încercarea cu tensiune continuă mărită..... 250
6.4.1.4. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice..... 250
6.4.1.5. Măsurarea nivelului descărcărilor parţiale..... 252
6.4.2. Motoare electrice de curent alternativ..... 253
6.4.2.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie..... 253
6.4.2.2. Încercarea cu tensiune alternativă mărită..... 254
6.4.3. Maşini de curent continuu..... 254
6.4.3.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie..... 254
6.4.3.2. Încercarea cu tensiune alternativă mărită..... 255
6.5. Diagnosticarea stărilor izolaţiilor cablurilor de energie..... 255
6.5.1. Încercarea izolaţiei cablurilor de energie noi..... 256
6.5.1.1. Încercări individuale..... 256
6.5.1.2. Încercări de tip..... 257
6.5.2. Diagnosticarea stărilor izolaţiilor cablurilor de energie aflate în exploatare..... 258
6.5.2.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie..... 258
6.5.2.2. Încercarea cu tensiune mărită..... 260
6.5.2.3. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice..... 260
6.5.2.4. Localizarea defectelor liniilor electrice subterane..... 261
Bibliografie..... 263

PREFAŢĂ

Datorită dezvoltării ştiinţei şi tehnologiei, energia electrică a devenit în prezent indispensabilă în aproape toate domeniile de activitate. De la generatoarele electrice, la sistemele de transport şi distribuţie şi până la cei mai mici consumatori, curentul electric străbate conductoare electrice izolate între ele cu ajutorul materialelor electroizolante sau a unor ansambluri formate din mai multe materiale numite sisteme de izolaţie electrică sau, simplu, izolaţii. Deşi sistemele de izolaţie electrică determină creşterea semnificativă a costurilor de fabricaţie, în lipsa lor, funcţionarea aparatelor, maşinilor şi tuturor celorlalte echipamente electrice este imposibilă.

Lucrarea de faţă se adresează, în primul rând, studenţilor Facultăţii de Inginerie Electrică din cadrul Universităţii Politehnica Bucureşti şi îşi propune să prezinte aspectele de bază referitoare la construcţia şi caracteristicile sistemelor de izolaţie electrică, în concordanţă cu solicitările care se exercită asupra acestora, precum şi principalele metode de încercare şi diagnosticare a stării izolaţiilor.

În primul capitol sunt prezentate funcţiile şi solicitările sistemelor de izolaţie electrică, principalele clase de materiale electroizolante folosite, precum şi caracteristicile constructive ale izolaţiilor folosite la transformatoare, maşini electrice, cabluri de energie şi izolatoare electrice.

Cel de-al doilea capitol este destinat prezentării principalelor fenomene care se produc sub acţiunea câmpului electric în izolaţii. Pentru fiecare grupă de materiale electroizolante sunt descrise aspectele referitoare la conducţia şi polarizarea electrică. În cel de-al treilea capitol este analizat fenomenul de străpungere a izolaţiilor. Pentru înţelegerea cât mai bună a acestui fenomen complex sunt prezentate principalele teorii de străpungere elaborate pentru fiecare clasă de materiale precum şi unele rezultate experimentale menite să evidenţieze influenţele diverşilor parametri asupra fenomenului de străpungere.

În cel de-al patrulea capitol sunt prezentate aspectele de bază referitoare la fenomenul de îmbătrânire a izolaţiilor electrice sub acţiunea solicitărilor termine, electrice şi mecanice. Un spaţiu mai amplu a fost rezervat prezentării fenomenelor legate de producerea descărcărilor parţiale şi formarea arborescenţelor electrice şi electrochimice în sistemele de izolaţie electrică.

Cel de-al cincilea capitolul este rezervat descrierii principalelor tipuri de încercări la care sunt supuse sistemele de izolaţie electrică în vederea evaluării proprietăţilor şi estimării duratei lor de viaţă. Ultimul capitol al lucrării prezintă cele mai importante metode de diagnosticare a stării sistemelor de izolaţie ale transformatoarelor, generatoarelor şi motoarelor electrice, precum şi a cablurilor de energie.

În încheiere, autorul mulţumeşte colectivului de Materiale electrotehnice şi Sisteme de izolaţie din cadrul Catedrei de Maşini, Materiale şi Acţionări electrice din Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea „Politehnica" Bucureşti care, direct sau indirect, au sprijinit apariţia acestei lucrări. În mod deosebit, autorul mulţumeşte domnului Prof. univ. dr. ing. Petru V. Noţingher pentru tot sprijinul acordat pe durata elaborării lucrării.

Autorul

1. STRUCTURA ŞI COMPONENTELE SISTEMELOR DE IZOLAŢIE

1.1. Locul şi rolul sistemelor de izolaţie

Sistemele de izolaţie electrică, numite adesea şi scheme de izolaţie sau, simplu izolaţii, reprezintă părţi constructive ale maşinilor electrice, transformatoarelor şi a altor echipamente electrice (întrerupătoare, comutatoare, cabluri de energie, izolatoare etc.) alcătuite dintr-un singur material electroizolant sau un ansamblul de materiale electroizolante, aflate în contact direct cu părţile conductoare ale acestora.

Sistemele de izolaţie electrică, numite în continuare în lucrarea de faţă sisteme de izolaţie (SI), constituie părţi ale instalaţiilor şi echipamentelor electrice care influenţează într-o foarte mare măsură funcţionarea şi durata de exploatare a acestora. Rolul principal al sistemelor de izolaţie este acela de a asigura izolarea electrică a diverselor părţi conductoare, aflate la potenţiale electrice diferite. Aşa cum se va prezenta în cadrul lucrării, pe lângă rolul principal de izolaţie electrică, sistemele de izolaţie constituie, după caz, şi suportul mecanic al căilor de curent, mediu de transmitere a căldurii, etc. Orice echipament electric are în componenţa sa un sistem de izolaţie care, odată străpuns, face imposibilă funcţionarea echipamentului în cauză. Sistemele de izolaţie sunt practic singurele părţi componente ale echipamentelor electrice care limitează tensiunea nominală U_n şi temperatura de funcţionare a acestora.

În funcţie de natura echipamentului electric, sistemele de izolaţie pot avea o structură simplă, fiind realizate dintr-un singur material electroizolant (gaz, lichid sau solid), sau o structură mai complexă, în acest caz fiind alcătuite din mai multe materiale electroizolante, cu structuri şi/sau stări de agregare diferite. Concepţia şi realizarea practică a sistemelor de izolaţie sunt strâns legate de formele geometrice ale căilor de curent, dar, şi de natura şi starea fizică a materialelor electroizolante utilizate. Pentru îndeplinirea funcţiilor de bază, sistemele de izolaţie sunt alcătuite din

materiale cu rezistivitate electrică foarte mare ($\rho = 10^6 - 10^{18}$ Ωm), având o lăţime a benzii interzise Fermi cuprinsă între 5 şi 9 eV.

Realizarea unui nou sistem de izolaţie implică un studiu multidisciplinar foarte atent coordonat şi realizarea unor încercări de laborator, care să permită caracterizarea comportării acestuia la diverşi factori de stres. Pe lângă cunoştinţe referitoare la proprietăţile electrice ale materialelor, sunt necesare şi cunoştinţe de mecanică, chimie, statistică, etc. Perioada de elaborare a unui astfel de proiect se poate întinde pe parcursul mai multor ani. După stabilirea structurii sistemului de izolaţie sunt necesare mai multe studii pentru evaluarea comportării acestuia şi a duratei lui de viaţă.

În etapele de elaborare a sistemelor de izolaţie ale echipamentelor electrice trebuie avute în vedere unele aspecte fundamentale printre care amintim:

- dimensionarea cât mai bună a izolaţiei electrice în vederea reducerii costurilor echipamentelor (din acest punct de vedere izolaţia trebuind să fie utilizată la solicitări foarte apropiate de solicitările maxime admisibile);
- menţinerea ratei de străpungere a izolaţiilor sub valorile acceptate de utilizatorii echipamentelor electrice;
- realizarea unor izolaţii noi, cu proprietăţi superioare celor existente, care să facă posibilă fabricarea unor echipamente electrice cu valori ale tensiunii din ce în ce mai mari.

În mod deosebit, în ultima perioadă aceste aspecte trebuie să fie coroborate şi cu o serie de restricţii referitoare la protecţia mediului înconjurător şi de anumite exigenţe legate de locul de amplasare a echipamentelor electrice (clădiri, centrale nucleare, reţele electrice speciale, etc.). Norme recente prevăd reducerea sau chiar suprimarea poluanţilor datoraţi dispersiei izolatorilor gazoşi, lichizi sau solizi în natură sau arderii acestor materiale (fenomen ce poate conduce la formarea unor produşi toxici sau corozivi). Nu în ultimul rând, un aspect important ce trebuie luat în considerare la realizarea sistemelor de izolaţie vizează costurile energetice. Tehnologiile de fabricaţie a sistemelor de izolaţie trebuie sa fie bazate pe consumuri de energie cât mai mici posibil.

1.2. Funcţiile şi solicitările sistemelor de izolaţie

Pe lângă principala funcţie de izolare electrică a părţilor metalice ale maşinilor şi echipamentelor electrice, sistemele de izolaţie mai îndeplinesc şi alte funcţii printre care amintim:

- suport mecanic pentru conductoare;
- mediu de transmitere şi evacuare a căldurii rezultate ca urmare a producerii pierderilor de energie în părţile active ale echipamentelor electrice;
- izolarea echipamentelor faţă de mediul exterior.

În consecinţă, realizarea şi dimensionarea izolaţiei electrice a unui echipament implică, în primul rând, cunoaşterea cât mai exactă a modului de funcţionare a acestuia şi a particularităţilor locului în care va fi exploatat. Prin urmare, alegerea materialelor ce compun sistemul de izolaţie se va face ţinând cont de toate funcţiile pe care acesta le va îndeplini în cadrul echipamentului.

Strâns legat de funcţiile îndeplinite, sistemele de izolaţie sunt supuse unor solicitări electrice, mecanice, termice, datorate radiaţiilor sau mediului ambiant. Deşi solicitările care apar în timpul funcţionării echipamentelor electrice sunt cele mai importante, semnalăm faptul că şi în procesul de fabricaţie există, de asemenea, solicitări care acţionează asupra izolaţiilor. În funcţie de natura lor, există solicitări de scurtă sau lungă durată, permanente (sau de exploatare) sau accidentale (caracteristice unor regimuri de funcţionare anormale a echipamentelor), constante sau variabile în timp.

În funcţie de intensităţile solicitărilor dar şi de intervalele de timp în care se exercită, efectele lor asupra stării izolaţiilor pot fi mai mult sau mai puţin importante. În practică, sistemele de izolaţie nu se deteriorează deodată. Astfel, sub acţiunea diverselor tipuri de solicitări, sistemele de izolaţie suferă transformări structurale ireversibile, care, aproape în toate cazurile, provoacă înrăutăţirea proprietăţilor, deci, determină degradarea lor în timp, adică îmbătrânirea. Îmbătrânirea sistemelor de izolaţie se reflectă cel mai bine în modificarea caracteristicilor electrice şi mecanice ale acestora. În acest sens, un exemplu îl constituie scăderea valorii rigidităţii electrice, creştea factorului de pierderi şi reducerea valorilor alungirii

relative la rupere. În consecință, solicitările izolațiilor, care determină îmbătrânirea acestora, conduc la înrăutățirea fiabilității izolației electrice, și deci, la creșterea ritmului de defectare în timp a echipamentelor electrice.

1.3. Componentele sistemelor de izolație

Materialele electroizolante folosite la realizarea sistemelor de izolație ale echipamentelor electrice ocupă o gamă foarte largă, de la produse naturale, vegetale și minerale, izolanți sintetici și până la cele mai noi materiale obținute prin tehnologii foarte avansate (nanotehnologii). În ceea ce privește evoluția sistemelor de izolație în decursul timpului, o scurtă trecere în revistă a acestora arată foarte clar că structura și materialele utilizate la fabricarea izolațiilor corespund nivelului cunoașterii științifice și tehnologice din perioadele de timp respective. Apariția telegrafiei, iluminatului, mașinilor electrice, ș.a. a implicat utilizarea la scară industrială a materialelor izolante. Încă de la început, selecția materialelor utilizate în sistemele de izolație a fost în strânsă legătură cu resursele locale, cu costul acestora, cu destinația echipamentelor respective dar și cu costurile specifice proceselor tehnologice de fabricație.

În perioada de început a industriei electrotehnice exista o încredere aproape generală în utilizarea materialelor electroizolante naturale. Sistemele de izolație erau concepute, aproape în totalitate, astfel încât solicitările electrice, mecanice, termice, etc. din exploatare să fie cu mult sub valorile maxime admisibile ale materialelor utilizate. Cu alte cuvinte, izolațiile erau mult supradimensionate ceea ce explică faptul că o parte din mașinile electrice fabricate în prima jumătate a secolului XX sunt încă în stare de funcționare. Odată cu trecerea timpului, datorită experienței de fabricație dobândite dar și datorită competiției dintre diverși producători, au fost dezvoltate noi sisteme de izolație cu structuri mai complexe, alcătuite din diverse combinații de materiale naturale, capabile să reziste la solicitări electrice, termice, mecanice și de mediu tot mai înalte. Un moment important în alegerea componentelor sistemelor de izolație îl reprezintă apariția, la începutul anilor 1950, a rășinilor sintetice. Dezvoltarea puternică

a petrochimiei a atras după sine pătrunderea materialelor polimerice în foarte multe domenii de activitate, inclusiv în industria electrotehnică.

Ca şi în cazul altor ramuri industriale, în concepţia şi fabricaţia echipamentelor electrice şi, implicit a sistemelor de izolaţie, un alt moment important l-a constituit apariţia şi răspândirea computerului. Din perioada de început a industriei şi până la momentul apariţiei mijloacelor moderne de calcul numeric, proiectarea maşinilor şi aparatelor electrice se realiza pe baza tabelelor de date, rezultate, în bună măsură, din experienţa de proiectare şi exploatare. În prezent, existenţa programelor de calcul numeric a repartiţiei câmpului electromagnetic şi a creşterii preciziei în procesele de fabricaţie, permite o dimensionare a sistemelor de izolaţie mult mai precisă şi mai economică, solicitările de serviciu având valori foarte apropiate de cele maxime admisibile şi, conducând astfel, la obţinerea unor echipamente mai ieftine.

În ceea ce urmează se vor prezenta principalele categorii de materiale electroizolante folosite la realizarea sistemelor de izolaţie.

1.3.1. Clasificarea în funcţie de starea de agregare

În funcţie de starea de agregare, materialele electroizolante utilizate la realizarea sistemelor de izolaţie sunt grupare în trei categorii:

- materiale electroizolante gazoase;
- lichide electroizolante;
- materiale electroizolante solide.

Dintre gazele utilizate în sistemele de izolaţie, cel mai răspândit este aerul (ca izolant sau impuritate), având proprietăţi dielectrice satisfăcătoare pentru valori moderate ale intensităţii câmpului electric. De asemenea, hidrogenul, azotul, gazele electronegative, ş.a. sunt folosite în realizarea schimelor de izolaţie ale echipamentelor electrice.

Din grupa materialelor electroizolante lichide fac parte uleiurile electroizolante naturale (uleiul mineral, de ricin) sau sintetice (clorurate, fluorurate, siliconice), dar şi anumite hidrocarburi utilizate ca solvenţi pentru lacurile electroizolante. În ceea ce priveşte cea de-a treia categorie, şi

anume materialele electroizolante solide, o prezentare succintă a acestora este realizată în paragraful 1.3.3.

1.3.2. Clasificarea după domeniul de utilizare

Acest criteriu de împărțire a materialelor electroizolante este mai puțin folosit deoarece același material poate avea mai multe utilizări. Totuși, există câteva grupe de materiale printre care amintim:

- materiale pentru realizarea izolației dintre straturile înfășurărilor;
- materiale pentru realizarea izolației de crestătură;
- materiale pentru izolarea capetelor de bobină;
- materiale de impregnare;
- materiale de acoperire.

1.3.3. Clasificarea după compoziția chimică

În general, componentele sistemelor de izolație se împart, după structura lor chimică, în trei grupe principale [1,2]:

- materiale organice;
- materiale anorganice;
- materiale siliconice (sau de trecere).

Materialele electroizolante organice prezintă proprietăți dielectrice și mecanice bune dar proprietăți termice inferioare celor anorganice. Din categoria materialele organice fac parte cele micromoleculare cum ar fi cerurile și substanțele ceroase, bitumurile și asfalturile. Printre materialele organice macromoleculare amintim rășinile naturale (șelacul, colofoniul și rășinile fosile), celuloza și derivații acesteia (triacetat de celuloză, benzil-celuloză, ș.a.), cauciucul natural, etc. Un loc foarte important în grupa materialelor electroizolante organice macromoleculare este ocupat de rășinile sintetice (de polimerizare, de policondensare și de poliadiție). Dintre acestea cele mai utilizate sunt polietilena, polipropilena, policlorura de vinil, politetrafluoretilenă, tereftalatul de polietilenă, ș.a.

Materialele anorganice prezintă un rol determinant în realizarea

sistemelor de izolaţie ale echipamentelor electrice care funcţionează la temperaturi mai ridicate [2]. Materialele anorganice pot fi utilizate la temperaturi de peste 200 °C fără a-şi schimba caracteristicile de bază. Aceste materiale nu se oxidează, nu se carbonizează şi prezintă o bună rezistenţă la acţiunea arcului electric şi a radiaţiilor. În raport cu materialele electroizolante organice, materialele anorganice prezintă proprietăţi mecanice inferioare (rezistenţă la tracţiune şi rezistenţă la încovoiere reduse). Acesta este motivul principal pentru care în sistemele de izolaţie, materialele anorganice sunt folosite împreună cu cele organice. În grupa materialelor electroizolante anorganice un loc foarte important este ocupat de mica şi produsele pe bază de mică (hârtia de mică, micalexul, micanitele şi micafoliile). Sticlele anorganice, ceramica electrotehnică, azbestul (folosit numai în cazuri speciale datorită acţiunii sale cancerigene), azbocimentul, rocile electroizolante (marmura, ardezia, talcul), oxizii metalici şi materialele refractare sunt de asemenea materiale anorganice folosite la realizarea sistemelor de izolaţie ale echipamentelor electrice.

Materialele siliconice sunt compuşi ai siliciului şi se obţin prin completarea valenţelor libere ale lanţului siloxanic cu radicali organici. Ca urmare a acestei structuri, proprietăţile lor îmbină caracteristicile electrice foarte bune ale materialelor organice cu stabilitatea chimică şi termică mare care caracterizează materialele anorganice. Siliconii rezistă foarte bine la temperaturi ridicate (200 °C), sunt neinflamabili şi nehigroscopici, nu dezvoltă gaze toxice şi aderă foarte bine la suprafeţele metalice. În funcţie de structura lor moleculară, materialele siliconice se prezintă sub formă de uleiuri sau unsori (cu molecule scurte şi arborescente), cauciucuri (cu molecule liniare unite prin punţi de legătură) şi răşini (reţele moleculare). Pe lângă proprietăţile dielectrice şi termice foarte bune, materialele siliconice au o aderenţă foarte bună atât în cazul unor materiale electroizolante precum sticlele şi ceramicile cât şi în cazul metalelor (fiind utilizate şi pentru fabricarea lacurilor de acoperire necesare realizării sistemelor de izolaţie pe bază de fibre de sticlă, mică, etc.). Răşinile siliconice au o largă utilizare în realizarea sistemelor de izolaţie ale maşinilor electrice de puteri mari şi tensiuni înalte datorită bunei rezistenţe la acţiunea descărcărilor parţiale. Nu în ultimul rând, siliconii sunt utilizaţi şi ca material de adaos în compoziţiile

de presare (pentru evitarea lipirii pieselor de matriţe), ca aditiv pentru cauciucurile sintetice, la fabricarea compoundurilor, etc.

1.3.4. Clasificarea după stabilitatea termică

Stabilitatea termică reprezintă capacitatea materialelor electroizolante de a rezista timp îndelungat la o anumită temperatură, fără ca proprietăţile lor (electrice, mecanice, etc.) să scadă sub o valoare limită, după care materialele nu-şi mai pot îndeplinii rolul în sistemul de izolaţie al echipamentului electric. Clasificarea materialelor electroizolante se realizează în urma unor *teste de anduranţă*. Acestea presupun îmbătrânirea termică a materialului şi stabilirea dependenţei dintre intervalul de timp necesar pentru atingerea criteriului de sfârşit de viaţă şi valoarea temperaturii de îmbătrânire [3].

În anul 1954 *Comisia Electrotehnică Internaţională* (CEI) a stabilit împărţirea materialelor electroizolante în funcţie de stabilitatea termică, introducând şapte clase de izolaţie (tabelul 1.1) [4,5]. Modul de determinare a clasei termice a unui material electroizolant este explicat în capitolul 5, § 5.2.1. Trebuie precizat însă că această clasificare care ţine seama de comportarea materialelor la acţiunea temperaturii, nu poate fi însă aplicată sistemelor de izolaţie alcătuite din mai multe componente. În general, pentru clasificarea termică a sistemelor de izolaţie, au fost introduse şi alte criterii. Conform CEI 60085 evaluarea stabilităţii termice (clasei termice) a unui SI se face prin comparaţie cu un material, numit adesea material de control, a cărei rezistenţă la acţiunea temperaturii este cunoscută.

În acest sens, se defineşte *indicele de anduranţă termică evaluată* (ATE) care reprezintă valoarea numerică a temperaturii, exprimată în grade Celsius, până la care materialul de control prezintă proprietăţi şi caracteristici satisfăcătoare pentru o anume aplicaţie. Se defineşte *indicele de anduranţă termică relativă* (RTE) care reprezintă valoarea numerică a temperaturii exprimată în grade Celsius, pentru care durata de viaţă estimată a izolatorului sau sistemului de izolaţie este aceeaşi cu durata de viaţă estimată a materialului de control obţinută pentru o temperatură egală cu anduranţa termică evaluată (ATE). Pe baza acestor considerente, materialele

Tabelul 1.1. Clasificarea materialelor electroizolante după stabilitate termică

Clasa de izolaţie	Materiale electroizolante
Y 90°C	materiale textile (din bumbac, mătase naturală, fibre de celuloză şi poliamidice), hârtii şi cartoane electroizolante, lemn, etc. polietilenă, polistiren, policlorura de vinil, cauciucul natural vulcanizat mase plastice de formare cu umplutură organică.
A 105°C	materiale textile (pe bază de bumbac, mătase naturală, celuloză, poliamide), lemn, hârtii şi cartoane, etc. pelicula izolantă a conductoarelor izolate cu emailuri poliamidice, răşini poliamidice, folii de triacetat de celuloză, folii poliamidice şi materiale combinate de tipul carton – folie; lacuri uleioase şi răşinoase, lichide electroizolante.
E 120°C	pelicula izolantă a conductoarelor emailate cu lacuri polivinil acetalice, poliuretanice sau epoxidice; răşini epoxidice, poliesterice şi poliuretanice; folii şi fibre şi ţesături de tereftalat de polietilenă; lacuri pe bază de răşini alchidice şi ulei.
B 130°C	materiale pe bază de mică sau hârtie de mică, fără suport sau cu suport din hârtie sau ţesături organice; materiale pe bază de fire şi ţesături de sticlă impregnate; mase plastice de formare cu umplutură anorganică şi materiale stratificate pe bază de sticlă; pelicula izolantă a conductoarelor emailate cu lacuri polietilentereftalice; lacuri epoxidice, poliuretanice, pe bază de răşini alchidice modificate.
F 155°C	materiale pe bază de mică sau hârtie de mică, stratificate, fără suport sau cu suport anorganic; izolaţii din fibre de sticlă, ţesături şi tuburi flexibile din sticlă impregnate, stratificate pe bază de fibre de sticlă; răşini siliconice modificate, răşini alchidice, epoxidice, cu stabilitate termică corespunzătoare.
H 180°C	materiale pe bază de mică, fără suport sau cu suport anorganic; fire şi ţesături de sticlă impregnate; mase plastice de formare cu umplutură anorganică; elastomeri siliconici fără suport sau cu suport anorganic; răşini şi lacuri siliconice.
C >180°C	materiale anorganice (mică, sticlă, ceramici, ardezie, micalex); materiale pe bază de mică, fără suport sau cu suport din fibre de sticlă; politetrafluoretilena; compuşi anorganici şi răşini siliconice cu stabilitate termică peste 225°C.

electroizolante și sistemele de izolație sunt clasificate în funcție de intervalele de valori ale indicelui RTE în zece clase termice (vezi tabelul 1.2 în care se prezintă și corespondența dintre noile clase termice și clasele de izolație) [5].

Conform standardelor în vigoare, clasificarea materialelor electroizolante în funcție de stabilitatea lor termică nu poate fi aplicată unui sistem de izolație care nu conține în structura sa materialele respective. De asemenea, clasificarea termică a unui material izolant nu poate fi dedusă plecând de la clasa de izolație a unui sistem de izolație care nu conține materialul respectiv. Clasa termică a unui material component al unui sistem de izolație nu poate fi, în general, desemnată ca fiind clasa termică a întregului SI.

În prezent, pe plan mondial, se preferă utilizarea claselor termice (clasa 105 °C sau clasa 200 °C) pentru clasificarea materialelor și sistemelor electroizolante. Spre exemplu, un material din clasa termică 155 °C trebuie să aibă o durată de viață medie de cel puțin 20000 h (aproximativ 3 ani) la o temperatură de 155 °C.

Tabelul 1.2. Corespondența între valorile RTE și clasele de izolație [4].

RTE [°C]	Clasa termică	Clasa de izolație
<90	70	
>90 - 105	90	Y
>105 - 120	105	A
>120 - 130	120	E
>130 - 155	130	B
>155 - 180	155	F
>180 - 200	180	H
>200 - 220	200	C
>220 - 250	220	
> 250	250	

În ultima perioada de timp, clasificarea materialelor din punct de vedere al RTE sau plasarea lor în anumite clase termice, numai pe baza comportării acestora la acțiunea temperaturii, este tot mai des pusă în

discuţie. Astfel, trebuie avut în vedere faptul că materialele electroizolante care fac parte din schemele de izolaţie ale maşinilor şi echipamentelor electrice sunt supuse adesea unor solicitări electrice, mecanice, de mediu, etc. de multe ori mai importante decât solicitările termice. De aceea, s-a propus ca atât materialele electroizolante cât şi sistemele de izolaţie mai complexe sa fie caracterizate prin *indici de performanţă*, care să exprime comportarea lor la acţiunea simultană a temperaturii, solicitărilor electrice, mecanice, etc.

1.4. Sistemele de izolaţie ale echipamentelor electrice

După prezentarea succintă a principalelor grupe de materiale electroizolante (vezi 1.3), în acest subcapitol vor fi analizate sistemele de izolaţie cele mai utilizate în fabricarea maşinilor şi echipamentelor electrice. În acest sens, se vor analiza anumite aspecte legate de structura şi componentele sistemelor de izolaţie, de realizarea practică a acestora şi de caracteristicile şi performanţele lor.

1.4.1. Transformatoare electrice

Sistemele de izolaţie electrică utilizate în general la fabricarea transformatoarelor electrice au evoluat odată cu obţinerea de noi materiale electroizolante. Pentru transformatoarele de putere din sistemele de transport şi distribuţie a energiei electrice, izolaţia principală este realizată din hârtie şi ulei mineral, pertinax, benzi textile, etc. În cazul transformatoarelor de putere au fost depuse eforturi însemnate pentru îmbunătăţirea performanţelor sistemelor de izolaţie, prin înlocuirea hârtiei celulozice cu alte tipuri de hârtie (de exemplu hârtie poliamidică sau *Nomex*) şi a uleiului mineral cu uleiuri sintetice. Cu toate acestea, datorită costurilor reduse şi a bunei comportări în exploatare, sistemul clasic de izolaţie hârtie-ulei este şi în zilele noastre foarte mult utilizat. În cazul transformatoarelor de puteri mai mici, utilizarea pe scară largă a răşinilor epoxidice a condus la modificarea structurii sistemelor de izolaţie. Astfel,

au fost realizate transformatoare cu înfășurări înglobate (prin turnare) în rășini epoxidice, foarte rezistente la acțiunea descărcărilor parțiale.

Mai mult ca oricând, în ultima perioadă de timp, tendința generală este aceea de realizare a unor noi sisteme de izolație care să facă posibilă obținerea unor transformatoare mai compacte și mai economice, lucru posibil prin:

- creșterea valorilor tensiunilor (de până la 1200 kV și chiar mai mari);
- reducerea pierderilor;
- reducerea nivelului de poluare;
- reducerea maselor și a gabaritelor ce trebuiesc transportate, etc.

Modul de realizare a sistemului de izolație al unui transformator depinde, în primul rând, de varianta constructivă a acestuia (uscat sau în ulei), de valorile tensiunilor celor două înfășurări și de puterea transformatorului. Transformatoarele de puteri mari, utilizate în sistemele de transport și distribuție a energiei electrice sunt, aproape în exclusivitate, transformatoare în ulei [6,7].

Principalele componente ale izolației unui transformator de putere sunt: cilindrii izolanți, izolația conductoarelor, izolația dintre straturile înfășurărilor, izolația dintre înfășurarea de înaltă și cea de joasă tensiune (numită și izolație principală), trecerile izolante, pene de fixare, etc.

Modalitatea de realizare și componentele izolației unui transformator depind de tipul înfășurărilor. După modul de dispunere a înfășurărilor pe coloanele miezului magnetic, deosebim:

- înfășurări concentrice (sau coaxiale), caz în care înfășurarea de joasă tensiune (j.t.) este dispusă la interior (fig. 1.1);
- înfășurări alternante, caz în care bobinele de joasă tensiune alternează cu cele de înaltă tensiune (î.t.) și au diametre egale (fig. 1.2).

Figurile 1.1 și 1.2. ilustrează modul diferit de realizare a izolației principale a transformatorului (situată între î.t. și j.t.) în cazul utilizării unor înfășurări concentrice sau de tip alternant. În primul caz (fig. 1.1), izolația principală este realizată unitar și poate conține mai multe straturi: izolație solidă (hârtie, carton, pertinax, etc.) și canale de ulei. În cel de-al doilea caz, izolația dispusă între bobinele alternante de joasă, respectiv, înaltă tensiune, este realizată sub forma unor inele izolante.

După forma constructivă, cele mai utilizate tipuri de înfăşurări pentru transformatoarele electrice sunt: înfăşurările cilindrice, înfăşurări stratificate şi înfăşurări în galeţi [6].

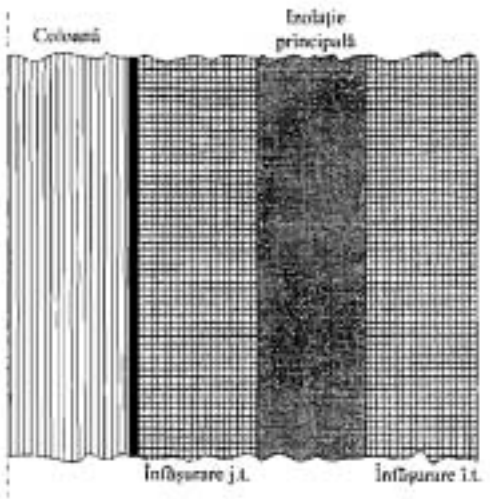


Fig. 1.1. Reprezentare schematică a înfăşurărilor coaxiale.

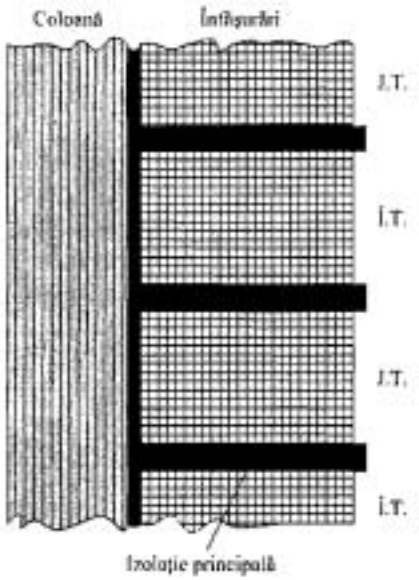


Fig. 1.2. Reprezentare schematică a înfăşurărilor alternante.

Înfășurările cilindrice (fig. 1.3) sunt sub forma unor spirale cilindrice realizate din conductoare cu secțiune dreptunghiulară izolate, astfel încât o spiră a înfășurării să fie izolată, din punct de vedere electric, de celelalte două spire vecine. Aceste înfășurări sunt folosite, de regulă, pentru intensități ale curentului electric inferioare valorii de 800 A și tensiuni mai mici de 1 kV. Solicitările electrice dintre două spire vecine sunt mici, în cazul acestor înfășurări, deoarece diferența de potențial este egală cu tensiunea pe spiră [6].

Înfășurările stratificate sunt folosite la transformatoarele de putere cu tensiuni de peste 1 kV (unii constructori utilizând acest tip de înfășurare până la valori ale tensiunii de 110 kV). Aceste înfășurări sunt realizate din conductoare rotunde sau profilate (fig. 1.4) dispuse pe un cilindru izolant, direct sau cu ajutorul unor pene. Înfășurarea se realizează în mod continuu în mai multe straturi [8]. Din punct de vedere al solicitărilor electrice ale izolației, înfășurările stratificate prezintă un dezavantaj important datorită faptului că valorile tensiunii dintre straturile înfășurării sunt mari. Tensiunea electrică care apare între două straturi U_{strat} este:

$$U_{strat} = 2w_s e_{sp}, \tag{1.1}$$

unde w_s reprezintă numărul de spire pe strat și e_{sp} este tensiunea pe spiră.

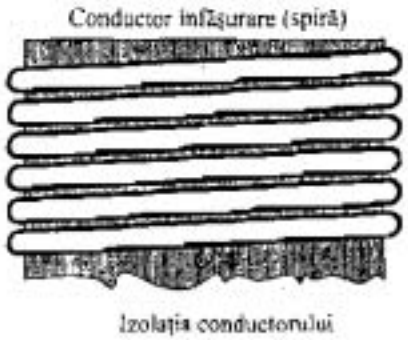


Fig. 1.3. Reprezentare schematică a înfășurărilor cilindrice.

Datorită valorii mari a tensiunii între straturile înfășurării U_{strat}, se folosesc izolații suplimentare realizate, pentru transformatoarele în ulei, din hârtie și, pentru transformatoarele uscate, din pânză de sticlă. În afară de

izolația dispusă între straturile înfășurării, primele 5-6% din spirele fiecărui strat prezintă o izolație suplimentară (în general se prevede al doilea strat de izolație) pentru a rezista la solicitările electrice provocate de supratensiuni.

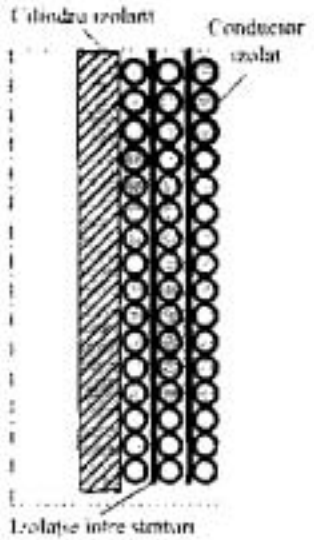


Fig. 1.4. Reprezentare schematică a înfășurărilor stratificate.

Înfășurările în galeți se folosesc pentru tensiuni înalte, de până la 60 kV, realizate cu spire multe și conductoare de secțiune mică. Aceste înfășurări sunt divizate pe lungime într-o serie de bobine mai mici numite galeți. În funcție de tipul constructiv, galeții sunt separați prin canale (umplute cu ulei) realizate cu ajutorul unor distanțiere sau cu ajutorul unor inele izolante. Numărul de galeți în care este divizată o înfășurare se determină practic în funcție de solicitările electrice ale izolației (fig. 1.5) [8].

Conexiunile înfășurărilor sunt izolate, în funcție de tipul constructiv al transformatorului și de valoarea tensiunii, cu bandă de hârtie și țesătură de bumbac sau cu cilindrii izolanți realizați din pertinax, carton etc.

Noile sisteme de izolație folosite în construcția transformatoarelor au la bază utilizarea unor noi materiale precum hârtia *Nomex* [9], hârtie celulozică cu aditivi polimerici, hârtie celulozică pentru transformatoare criogenice, uleiuri siliconice cu proprietăți dielectrice superioare, hexaflorura de sulf (SF_6), etc.

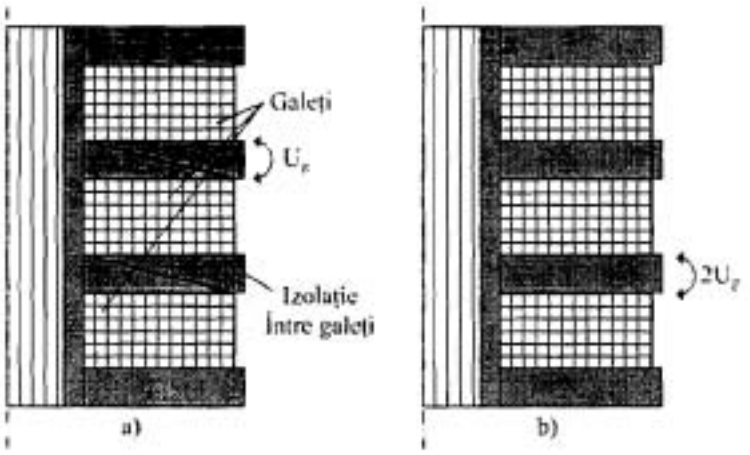


Fig. 1.5. Reprezentareaschematică a înfășurărilor în galeți.

Hârtia *Nomex* face parte din categoria hârtiilor poliamidice și are caracteristici mecanice, termice și electrice foarte bune. Este folosită, de regulă, în sistemele de izolație ale unor transformatoare compacte, uscate sau în ulei siliconic, care funcționează la temperaturi ridicate (>150 °C). Stabilitatea termică a hârtiei *Nomex* este foarte bună, producătorii indicând conservarea proprietăților electrice și mecanice timp de zece ani la o temperatură de funcționare continuă de 220°C [9]. Datorită structurii sale polimerice, hârtia *Nomex* este folosită și în sistemele de izolație ale unor echipamente criogenice (în combinație cu azotul lichid la 77 K). Un alt avantaj al hârtiei *Nomex* în raport cu hârtia celulozică îl reprezintă higroscopicitatea mult mai redusă, știut fiind faptul că prezența și reținerea apei în sistemele de izolației determină îmbătrânirea accelerată a acestora.

Transformatoarele uscate, cu izolația realizată din hârtie *Nomex*, sunt în general utilizate în sistemele locale de distribuție (puteri de mai multe zeci de MVA și tensiuni inferioare valorii de 35 kV). Experiența arată că aceste echipamente au, în general, o durată de viață mai mare de 35 de ani. Transformatoarele în ulei siliconic cu izolația solidă realizată din hârtie *Nomex*, au o arie de aplicații foarte extinsă: transportul și distribuția energiei, tracțiunea electrică, aplicații industriale, etc. Avantajele principale în raport cu izolația clasică, rezidă în principal în reducerea semnificativă (cu până la 25%) a masei și gabaritului pentru aceeași putere a

transformatorului, reducerea cantităţii necesare de ulei, reducerea pierderilor specifice de energie, etc. În raport cu izolaţia clasică, pentru aceeaşi greutate şi acelaşi gabarit al transformatorului, sistemul de izolaţie cu hârtie *Nomex* poate asigura creşterea tensiunilor înfăşurărilor cu până la 50%. Desigur, principalul dezavantaj al acestui sistem de izolaţie îl reprezintă costul semnificativ mai mare decât cel al izolaţiei realizată din hârtie celulozică şi ulei mineral.

Un alt sistem de izolaţie utilizat în construcţia transformatoarelor are la bază hârtia celulozică cu aditivi plastici. Punctul de plecare în elaborarea acestuia l-a constituit încercarea de a reduce permitivitatea relativă ε_r a hârtiei celulozice impregnate cu ulei mineral [7]. Ideea are la bază faptul că valorile intensităţii câmpului electric în componentele unui sistem de izolaţie (cum este cazul celui de tip hârtie-ulei) sunt invers proporţionale cu valorile constantelor dielectrice ale acestora. Aplicarea unei tensiuni U unei izolaţii alcătuită din două straturi de grosimi d_1, respectiv d_2 şi permitivităţi ε_1, respectiv ε_2 conduce la existenţa următoarelor căderi de tensiune pe cele două straturi:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1 d_1}{E_2 d_2} = \frac{\varepsilon_2 d_1}{\varepsilon_1 d_2}, \tag{1.2}$$

unde U_1 şi U_2 reprezintă căderea de tensiune pe stratul 1, respectiv pe stratul 2 al izolaţiei. Pentru sistemul de izolaţie hârtie-ulei cu $\varepsilon_{r_hârtie} = 4{,}4$ şi $\varepsilon_{r_ulei} = 2{,}2$, rezultă solicitări electrice duble ale uleiului mineral.

Dintre toate soluţiile propuse pentru scăderea permitivităţii hârtiei, combinarea fibrelor celulozice cu fibre organice sintetice (cum ar fi cele de polipropilenă, poliester, politetrafluoretilenă, etc.) a condus la obţinerea celor mai bune rezultate. Există însă şi unele neajunsuri referitoare la dizolvarea fibrelor plastice în uleiul mineral. De exemplu, fibrele de polipropilenă sunt dizolvate în uleiul mineral în jurul temperaturii de 130°C. Cele mai bune rezultate au fost obţinute utilizând fibrele de politetrafluoretilenă.

În cazul transformatoarelor criogenice se constată că sistemele de izolaţie cu proprietăţi bune şi care implică costuri relativ scăzute sunt bazate pe hârtia celulozică şi azotul lichid (care are şi rolul de agent de răcire) [7].

Anumite studii arată că hârtia celulozică în azot lichid are proprietăţi dielectrice foarte bune, similare cu cele ale materialelor polimerice uzuale. De asemenea, proprietăţile mecanice ale hârtiei în azot lichid par să fie superioare (cu până la 20%) celor ale hârtiei impregnate în ulei mineral.

O altă modificare importantă a sistemului clasic de izolaţie al transformatoarelor vizează utilizarea uleiului siliconic în locul celui mineral. Înlocuirea uleiului mineral cu ulei siliconic, superior din punct de vedere al proprietăţilor dielectrice, permite obţinerea unor transformatoare cu caracteristici îmbunătăţite. Studiile referitoare la îmbătrânirea izolaţiei hârtie celulozică – ulei siliconic indică faptul că modificările în timp ale proprietăţilor hârtiei în ulei siliconic şi în ulei mineral sunt sensibil asemănătoare (figurile 1.6 - 1.8). În schimb, în urma procesului de îmbătrânire, uleiului siliconic îşi păstrează aproape neschimbate caracteristicile iniţiale. Pe de altă parte, permitivitatea uleiului siliconic mai mare cu aproximativ 25% faţă de cea a uleiului mineral, asigură o repartiţie mai convenabilă a câmpului electric în interiorul izolaţiei [7].

Un alt sistem de izolaţie utilizat în cazul transformatoarelor are la bază hârtia celulozică şi hexafluorura de sulf (SF_6). Astfel de transformatoare au o construcţie specială, unitatea de transformare fiind plasată în interiorul unei anvelope ce menţine hexafluorura de sulf la o presiune cuprinsă între 5 şi 8 bari [7]. Numeroase studii au arătat că hârtia celulozică în SF_6 prezintă caracteristici dielectrice şi mecanice bune. Fig. 1.9 arată că tensiunea de străpungere a sistemului de izolaţiei hârtie-SF_6 este net superioară tensiunii de străpungere a hexafluorurii de sulf. Pe de altă parte se constată că degradarea termică a hârtiei din izolaţia de tipul hârtie - SF_6 este mai redusă decât în cazul hârtiei aflate în atmosferă liberă.

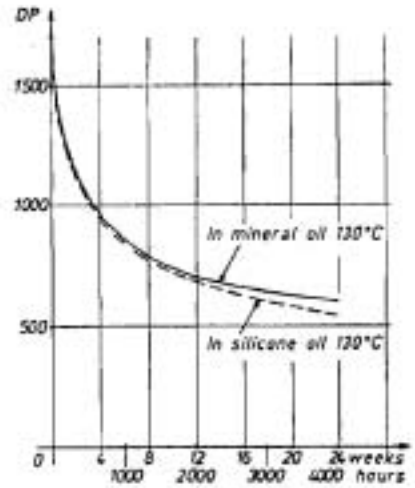


Fig. 1.6. Variaţia în timp a gradului de polimerizare a hârtiei îmbătrânită în ulei siliconic şi în ulei mineral la 130°C [7].

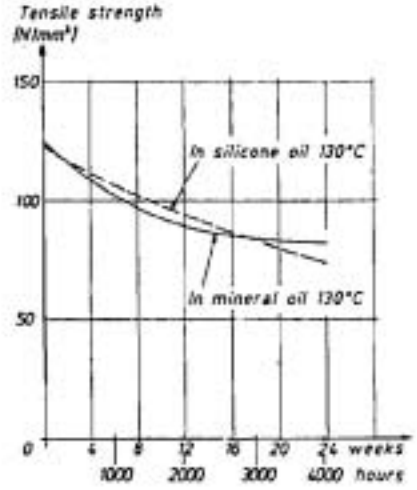


Fig. 1.7. Variaţia în timp a rezistenţei la alungire a hârtiei îmbătrânită în ulei siliconic şi în ulei mineral la 130°C [7]

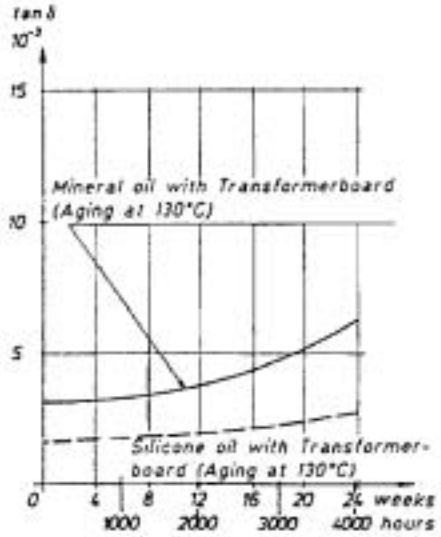


Fig. 1.8. Dependenţa factorului de pierderi a hârtiei celulozice impregnată cu ulei siliconic, respectiv cu ulei mineral în funcţie de durata de îmbătrânire la 130°C [7]

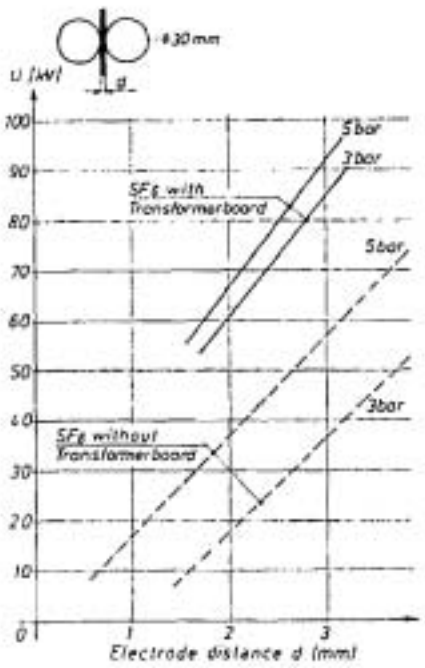


Fig. 1.9. Tensiunea de străpungere a izolației hârtie - SF_6 și SF_6 în funcție de distanța dintre electrozi la $p = 3$, respectiv 5 bari. [7]

1.4.2. Motoare și generatoare electrice

În decursul timpului, numeroase mașini electrice rotative au fost inventate și fabricate. Creșterea numărului de companii constructoare în domeniu a condus la o puternică dezvoltare a acestei ramuri industriale. Astfel, pe lângă îmbunătățirea părților active ale mașinilor electrice (înfășurările și circuitele magnetice), o atenție deosebită a fost acordată și îmbunătățirii sistemelor de izolație ale acestora. Construcția mașinilor electrice și, deci, a sistemelor de izolație utilizate, depinde, în primul rând, de tipul acestor echipamente. În funcție de tensiunea utilizată (în cazul motoarelor) sau produsă (în cazul generatoarelor) deosebim mașini electrice de curent continuu și mașini electrice de curent alternativ. Acestea din urmă, în funcție de principiul lor de funcționare, pot fi asincrone sau sincrone. Toate aceste categorii de mașini electrice au fost și sunt și în prezent

utilizate într-un mare număr de aplicaţii. Din punct de vedere al realizării şi comportării în timp a izolaţiilor, maşinile electrice care prezintă probleme deosebite şi constituie principalul obiect al acestei prezentări, sunt cele de puteri medii şi mari (kW şi MW) şi tensiuni înalte şi anume, motoarele sincrone şi asincrone şi generatoarele sincrone. Un factor important care determină alegerea materialelor şi tehnologiilor utilizate în construcţia acestor maşini este sistemul de răcire. Pierderile Joule care se produc în înfăşurări, pierderile magnetice, frecările mecanice, etc. produc încălzirea puternică a diverselor părţi ale acestor maşini, de unde şi necesitatea de a le echipa cu sisteme eficiente de răcire: ventilare directă sau indirectă cu aer (pentru motoare şi generatoare cu puteri de până la 100 MVA) sau hidrogen (în cazul turbogeneratoarelor), răcire cu apă, etc. [8,10]

Sistemele de izolaţie ale maşinilor electrice, fie ele motoare sau generatoare, au două părţi importante, realizate independent una faţă de cealaltă: izolaţia statorului şi izolaţia rotorului. Atât într-un caz cât şi în celălalt, izolaţia reprezintă partea pasivă a maşinii care nu ajută la producerea câmpului magnetic şi nici nu „conduce" liniile acestuia. Mai mult decât atât, prezenţa izolaţiei determină creşterea preţului motoarelor şi generatoarelor, producând, în acelaşi timp creşterea gabaritelor acestora şi reducându-le astfel eficienţa. Pe de altă parte, în lipsa izolaţiei, conductoarele de cupru din înfăşurări s-ar afla în contact electric unul cu celălalt sau cu circuitul magnetic (statoric sau rotoric), ceea ce ar conduce practic la imposibilitatea funcţionării maşinii electrice.

Ca şi în cazul altor echipamente electrice, izolaţiile statoarelor şi rotoarelor constituie practic părţile componente care determină duratele de viaţă ale maşinilor electrice. Spre exemplu, o statistică realizată în anul 2003 de *Comitetul de studii Cigre SC* 11 indică faptul că în proporţie de 56 % defectele care survin în exploatarea hidrogeneratoarelor sunt datorate izolaţiei electrice (fig. 1.10).

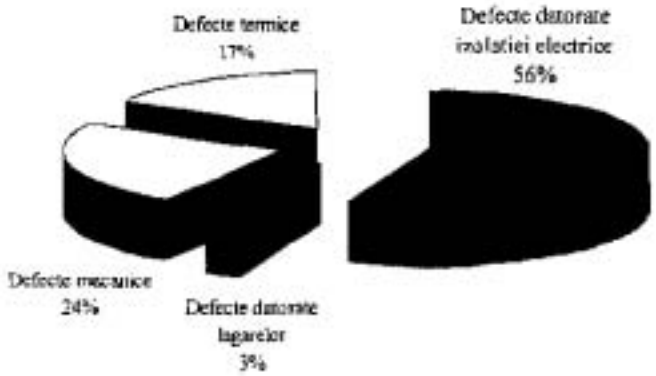


Fig. 1.10. Tipurile de defecte şi proporţiile în care acestea intervin în cazul hidrogeneratoarelor [11].

În general, din punct de vedere constructiv, sistemele de izolaţie ale statoarelor şi rotoarelor au aceleaşi componente, dar materialele folosite pot fi diferite în cazul anumitor maşini. Faptul că statorul reprezintă, în marea majoritate a cazurilor, partea fixă a maşinii, la nivelul sistemelor de izolaţie statorice eforturile mecanice sunt mai reduse şi temperatura înfăşurării poate fi mai eficient controlată cu ajutorul sistemelor de răcire. În consecinţă, în cazul izolaţiilor folosite la statoarele maşinilor uzuale, constituentele principale sunt materialele electroizolante organice care, aşa cum s-a prezentat anterior, au proprietăţi termice şi mecanice reduse.

Pentru o bună înţelegere a principalelor probleme care vizează realizarea izolaţiilor dar şi a solicitărilor la care acestea sunt supuse în timpul funcţionării, vom prezenta în continuare structura şi caracteristicile sistemelor de izolaţie ce echipează statoarele şi rotoarele maşinilor electrice rotative.

1.4.2.1. Sistemele de izolaţie ale înfăşurărilor statorice

Structura sistemelor de izolaţie utilizate la statoarele maşinilor electrice este în strânsă legătură cu tipul înfăşurărilor. Construcţia şi tipul înfăşurării depind de o serie de factori, dintre care o pondere însemnată o au în special puterea, tensiunea şi tipul de protecţie şi ventilaţie al maşinii.

Pentru maşinile mici, cu puteri de până la 10 kW, se folosesc de regulă înfăşurări într-un strat, cu bobine realizate din conductor rotund, crestăturile statorului fiind semiînchise sau semideschise, de formă ovală sau trapezoidală (fig. 1.11). Capetele de bobine sunt, cel mai adesea, dispuse în două etaje. Aceste maşini se construiesc numai pentru tensiuni mici, inferioare valorii de 1000 V. Schema de izolaţie adoptată în general pentru acest tip de maşini, este prezentată în fig. 1.11.

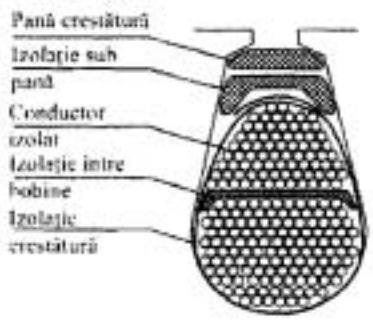


Fig. 1.11. Schema de izolaţie a unei crestături ovale, de joasă tensiune, pentru maşinile de puteri mici, în care este dispusă o înfăşurare compusă din două bobine realizate din conductor rotund de cupru.

Pentru maşinile de puteri medii sau mari de joasă tensiune, se folosesc înfăşurări din conductor rotund realizate într-un strat sau în două straturi, crestăturile statorului având aceeaşi formă ca şi cele ale maşinilor de puteri mici. La aceste maşini, înfăşurările pot fi realizate şi din conductor profilat sau din bare; în aceste situaţii înfăşurările sunt realizate numai în două straturi. Pentru maşinile de tensiuni înalte, înfăşurările se construiesc numai din conductor profilat [8].

Schemele de izolaţie ale bobinelor în crestătură şi în partea frontală (capetele de bobină) depind în primul rând de valoarea tensiunii, existând diferenţe semnificative între schemele de izolaţie ale înfăşurărilor de înaltă tensiune comparativ cu cele de joasă tensiune).

Principalele componente ale sistemelor de izolaţie sunt indicate în figurile 1.12-1.15. În cazul maşinilor de puteri foarte mari în ale căror înfăşurări statorice intensitatea curentului ia valori însemnate, datorită

efectului pelicular (refularea curentului), spirele sunt constituite din mai multe căi de curent în paralel (vezi fig. 1.15) ceea ce implică folosirea obligatorie a unei izolații de spiră. Utilizarea spirelor constituite din mai multe conductoare în paralel are și un alt avantaj tehnologic, bobinele astfel constituite putând fi introduse mai ușor și cu un risc de degradare mecanică mai redus decât în cazul barelor de secțiuni mari [12].

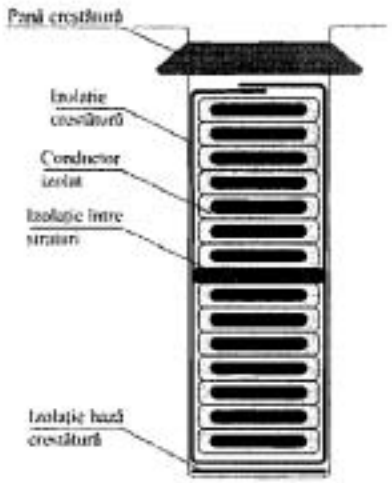


Fig. 1.12. Schema de izolație a unei crestături dreptunghiulare în care este dispusă o înfășurare de joasă tensiune în două straturi realizată din conductor de cupru profilat.

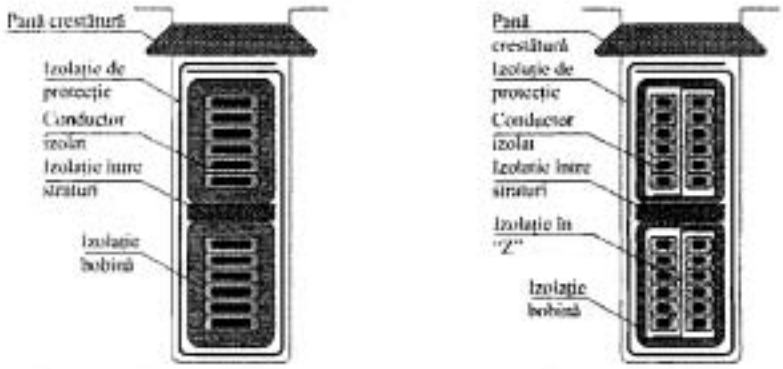


Fig. 1.13. Schemele de izolație ale unei crestături dreptunghiulare în care sunt dispuse înfășurări de înaltă tensiune în două straturi, realizate din conductoare profilate.

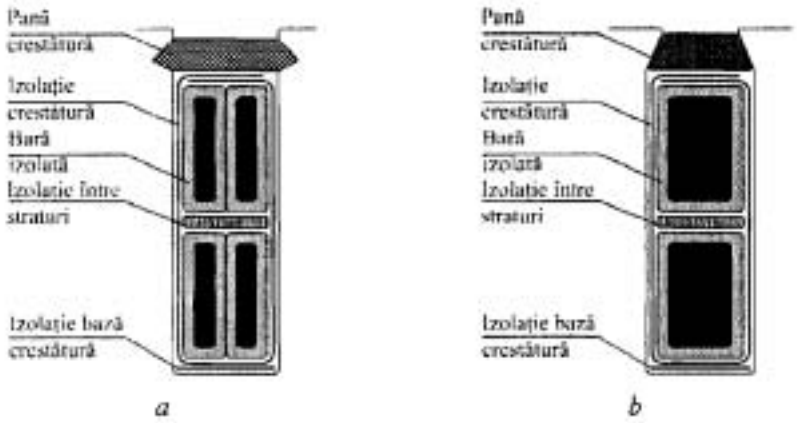


Fig.1.14. *a* - Schema de izolaţie a unei crestături dreptunghiulare în care este dispusă o înfăşurare de joasă tensiune realizată din bare de cupru tip continuu; *b* - Schema de izolaţie a unei crestături dreptunghiulare în care este dispusă o înfăşurare de joasă tensiune realizată din semibare de cupru (cu mufe de înseriere între ele).

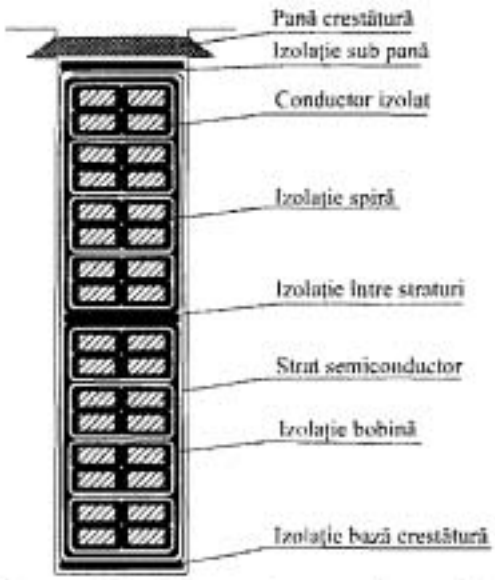


Fig. 1.15. Schema de izolaţie a unei crestături statorice în care este dispusă o înfăşurare de înaltă tensiune realizată din conductoare de cupru profilate cu mai multe căi de curent pe spiră.

a) Izolația conductoarelor

Rolul principal al izolației conductoarelor din care sunt realizate înfășurările mașinilor electrice este acela de a izola din punct de vedere electric două sau mai multe conductoare alăturate. Din punct de vedere al solicitărilor electrice, pelicula izolatoare a conductoarelor este supusă acțiunilor câmpului electric datorat diferențelor de potențial existente între conductoarele înfășurării. Pe de altă parte, în timpul realizării bobinelor, izolația conductorului este supusă unor eforturi mecanice complexe de încovoiere, întindere și compresiune, ceea ce poate duce la apariția fisurilor. În consecință, izolația conductoarelor trebuie să prezinte proprietăți mecanice foarte bune. Un alt factor important care trebuie avut în vedere este acela că pelicula izolatoare a conductoarelor reprezintă partea sistemului de izolație care vine în contact nemijlocit cu calea de curent. Deoarece conductorul de cupru reprezintă componenta statorului în care temperatura atinge valoarea cea mai înaltă (datorită existenței pierderilor Joule), izolația acestuia este supusă unor solicitări termice intense și de lungă durată. Prin urmare, pe lângă proprietățile electrice și mecanice, izolația conductorului trebuie să prezinte și o bună rezistență la solicitările termice de durată și să asigure evacuarea căldurii către exteriorul înfășurărilor [12,13].

Primele izolații de conductor, utilizate în debutul secolului XX, erau realizate cu ajutorul unor materiale precum fibrele și țesăturile de bumbac sau mătase impregnate cu rășini naturale. Rezultau astfel izolații groase, cu proprietăți mecanice și termice reduse și care îngreunau procesul de realizare a bobinelor. După cel de-al doilea război mondial rășinile sintetice au început să fie utilizate tot mai mult pentru izolarea conductoarelor. Utilizarea acestora a deschis calea realizării unor izolații cu proprietăți mult îmbunătățite. Și în zilele noastre peliculele izolante al conductoarelor sunt realizate din lacuri de emailare, care au o bună aderență la suprafețele conductoarelor, o elasticitate crescută și proprietăți dielectrice foarte bune. Cele mai utilizate sunt lacurile polivinilacetalice (utilizate pentru acoperirea a peste 50% din conductoarele emailate), poliamidice, epoxidice, poliuretanice, tereftalice, siliconice etc. Folosirea acestor lacuri de emailare

face posibilă realizarea unor mașini electrice situate în clasa termică C care pot funcționa la temperaturi de până la 220°C [12].

În motoarele și generatoarele de putere medie, în general bobinele sunt preformate (pe șablon), fiind realizate din conductoare profilate sau rotunde, spirele putând fi constituite din mai multe căi de curent izolate unele față de celelalte. Până către sfârșitul anilor 1970, în majoritatea cazurilor, constructorii echipau fiecare spiră cu o izolație proprie (fig. 1.14) realizată, după caz, din hârtie de mică pe suport polimeric sau dintr-un simplu film polimeric. Pentru simplificarea proceselor tehnologice, în timp s-a renunțat la izolația de spiră, rolul acesteia fiind preluat tot de izolația proprie a conductoarelor, cu o grosime ușor crescută pentru a face față solicitărilor complexe din timpul fabricației și al exploatării.

Izolațiile folosite în cazul înfășurărilor mașinilor de puteri mari și tensiuni ridicate sunt cele mai complexe. Înfășurările sunt realizate din bare de cupru preformate și tehnologiile de realizare a izolației bazate pe:

- utilizarea benzilor izolante preimpregnate cu rășini;
- impregnarea la presiune foarte scăzută a întregului stator (VPI – vacuum pressure impregnation).

Tehnologia bazată pe utilizarea benzilor preimpregnate cu rășini polimerice s-a dezvoltat odată cu apariția hârtiei de mică. Cu ajutorul hârtiei de mică și țesăturilor de sticlă cu rășini epoxidice sau siliconice modificate au fost realizate micabenzile utilizate azi, caracterizate de proprietăți dielectrice foarte bune și de o remarcabilă rezistență la acțiunea descărcărilor parțiale. Izolațiile realizate din micabenzi prezintă și rezistență sporită la umiditate, praf, agenți chimici, o elasticitate bună, dar și un coeficient de dilatare foarte apropiat de cel al cuprului. Izolațiile realizate din micabenzi sunt izolații discontinue; astfel, după acoperirea barei statorice cu straturi de micabandă, bara rezultată este supusă la trei operații tehnologice importante: o uscare sub vid la cald pentru eliminarea solvenților și a apei, o presare la cald de scurtă durată pentru aducerea dimensiunilor barei la cotele corespunzătoare crestăturii și polimerizarea izolației (prin aducerea barei la o anumită temperatură). Tot din rășini epoxidice și siliconice sunt realizate și chiturile de umplere a golurilor din transpoziții, chiturile de etanșare sau izolare a conexiunilor [12,13].

Primul sistem de izolaţie care a utilizat micabenzi preimpregnate a fost introdus în anul 1949 de compania *Westinghouse* (WA) sub numele de *Thermalastic*™ [14]. Răşinile folosite erau cele poliesterice. Alte asemene sisteme care utilizau tot răşinile poliesterice şi micabenzi au fost produse în perioada imediat următoare sub licenţa *National Electric Coil* (*Neccobond*™) şi *Kraftwerk Union* (*Micalastic*™). În anul 1953 *Oerlikon* din Elveţia propune utilizarea răşinilor epoxidice în sistemele de izolaţie ale maşinilor de puteri mari şi tensiuni înalte. În 1958 este rândul companiei General Electric să introducă sistemul de izolaţie *Micapal*™ 1 bazat pe micabenzi din muscovit calcinat şi răşini epoxidice. În anul 1966 aceeaşi companie introduce sistemele *Epoxi Mica Mat*™, *Micapal HT*™ realizate din micabenzi pe suport de fibre de sticlă şi un amestec de răşini epoxidice, răşini fenolice şi un procent de 7 – 10 % de solvenţi speciali. Mai târziu, în 1978 este introdusă şi izolaţia *Hydromat*™ [15] pentru statoarele hidrogeneratoarelor de foarte mare putere bazată tot pe micabenzi preimpregnate cu răşini epoxidice speciale.

În ultimul timp au fost fabricate o serie de noi benzi pentru izolarea conductoarelor maşinilor de puteri mari şi tensiuni înalte. Pe lângă stratul de mică, acestea conţin filme polimerice (poliesteri) foarte subţiri acoperite cu lacuri adezive (răşini) - (fig. 1.16).

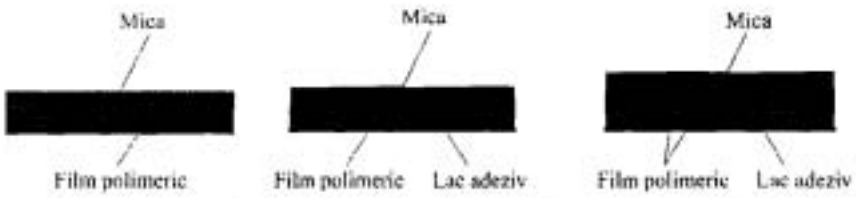


Fig. 1.16. Benzi realizate din mică şi filme polimerice pentru izolaţiile maşinilor de puteri mari şi tensiuni înalte.

Cel de-al doilea procedeu tehnologic dezvoltat de producătorii de maşini electrice de puteri mari este cel care presupune impregnarea întregului stator cu răşini polimerice [12]. Operaţia de impregnare se face la o presiune foarte scăzută care să asigure pătrunderea răşinilor în spaţiile cele mai înguste şi eliminarea golurilor de aer (ce conduc la apariţia descărcărilor parţiale). Pentru aceasta, după introducerea şi fixarea barelor

în crestăturile statorului, întreg ansamblu este cufundat în întregime într-un recipient care conține rășina de impregnare (epoxidică, poliesterică, poliesterimidică sau siliconică). În cazul unor statoare cu gabarit foarte mare, anumiți fabricanți utilizează și impregnarea separată a fiecărei bare statorice (de exemplu sistemul *Micadur*™ introdus în anul 1955 de *Brown Boveri*). Compania *Siemens* a realizat în 1960 sistemul de izolație *Micalastic*™ [16] bazat pe tehnologia VPI, hârtie de mică și rășini epoxidice. Alte sisteme de izolație bazate pe tehnologia VPI au fost introduse de *General Electric*, *Alsthom* sau *Toshiba* [12]. Noile sisteme prezintă proprietăți termice, electrice și mecanice mai bune și sunt realizate din materiale cu un impact foarte mic asupra mediului înconjurător. Rășinile epoxidice utilizate în cadrul acestor noi sisteme conțin catalizatori care accelerează procesul de polimerizare.

b) Izolația secțiilor sau bobinelor

În general, în cazul mașinilor electrice de înaltă tensiune, fiecare dintre bobinele înfășurării are o izolație proprie. Există însă și situații în care izolația bobinelor lipsește, rolul ei fiind preluat de izolația conductoarelor (barelor) și/sau spirelor după caz. Uneori, în interiorul bobinelor este dispusă și o izolație „în z" – fig. 1.13. Această izolație, dispusă pe întreaga lungime a bobinei, este realizată din folie flexibilă cu grosimea de 0,2 – 0,3 mm. Pentru clasa de izolație B, părțile active ale secțiilor sau bobinelor sunt izolate cu o teacă de micafoliu cu șelac pe suport de hârtie sau samicafoliu preimpregnat cu rășini sintetice. Pentru clasa de izolație F se folosește micafoliu pe pânză de sticlă sau samicafoliu pe pânză de sticlă preimpregnat cu rășini sintetice din clasa F. Pentru clasa de izolație H se folosesc materiale similare cu cele din clasa F, cu deosebirea că lacurile de impregnare sunt siliconice. În anumite cazuri sunt utilizate cauciucuri siliconice cu sau fără inserție din fibre de sticlă.

c) Izolația de crestătură

Izolația crestăturii reprezintă componenta sistemului de izolație a mașinii care izolează conductoarele (bobinele) înfășurării de miezul magnetic statoric sau rotoric. Străpungerea izolației de crestătură și producerea unui scurcircuit între înfășurare și circuitul magnetic conduce la scoaterea din uz a mașinii electrice. În consecință, izolația crestăturii reprezintă una dintre componentele de bază ale sistemului de izolație.

Pentru mașinile de puteri mici și tensiuni joase, izolația de crestătură are mai mult un rol de protecție mecanică a înfășurărilor, materialele din care este realizată necesitând o bună rezistență la frecare și abraziune dar și la solicitările mecanice la care sunt supuse în timpul realizării înfășurărilor.

În cazul mașinilor de puteri mari și tensiuni înalte, izolația de crestătură necesită o mai mare atenție. Spre exemplu, dacă considerăm bobinele sau barele ce formează înfășurarea statorică a unei faze a unui generator cu tensiunea de fază de 13,8 kV, rezultă că între conductorul de cupru și miezul statoric există o diferență de potențial de 8 kV, ceea ce determină existența unor solicitări electrice importante ale izolației. În consecință și izolația crestăturii trebuie să fie astfel aleasă încât să reziste la aceste solicitări electrice. O altă constrângere în alegerea izolației de crestătură este reprezentată de solicitările termice la care aceasta este supusă permanent în timpul funcționării. Căldura rezultată din pierderile Joule în înfășurări este transmisă prin izolația crestăturii miezului magnetic. Din acest considerent, materialele folosite pentru această parte a sistemului de izolație trebuie să fie caracterizate de o conductivitate termică crescută (de aceea izolație de crestătură trebuie să conțină cât mai puține goluri).

De asemenea, un alt punct important în alegerea izolației de crestătură pentru mașinile de puteri mari este reprezentat de solicitările mecanice. Asupra conductoarelor (barelor) înfășurării statorice se exercită, în timpul funcționării, forțe magnetice foarte însemnate. O primă categorie de forțe magnetice sunt cele care se exercită radial între bobinele / barele situate în aceeași crestătură. Datorită acestor forțe, conductoarele vibrează în crestături. Forța care acționează pe unitatea de lungime a unei bare situată la distanta d (exprimată în metrii) de partea inferioară a crestăturii

este dată de următoarea expresia:

$$F = \frac{kI^2}{d} \text{ kN/m}, \tag{1.3}$$

unde I reprezintă valoarea efectiva a curentului electric ce străbate bara statorică și factorul $k = 0{,}96$. Dacă $i(t) = I_0 \sin\omega t$, cu pulsația $\omega = 2\pi f$, forța ce se exercită asupra conductoarelor se poate exprima:

$$F = \frac{kI_0(1-\cos 2\omega t)}{2d}. \tag{1.4}$$

Astfel pentru o frecvență a curentului electric $f = 50$ Hz, vibrația conductoarelor din crestături este caracterizată de o valoare dublă a frecvenței de 100 Hz. În afara forțelor radiale, barele statorice mai sunt supuse și forțelor de interacțiune dintre curenții ce le parcurg și câmpul magnetic rotoric. Aceste forțe ating însă numai 10 % din valoarea celor radiale [12].

În cazul mașinilor electrice ale căror tensiuni nominale depășesc 4 kV se produc descărcări parțiale (DP). Acestea apar în zonele în care izolația prezintă goluri de aer și/sau intensitatea locală a câmpului electric este mare datorită unor defecte, muchii ascuțite, etc. Descărcările parțiale determină degradarea (erodarea) continuă a izolației și din acest punct de vedere realizarea sistemelor de izolație implică și eliminarea sau reducerea acestor descărcări.

În cazul mașinilor electrice cu tensiunea nominală sub 1 kV, izolația de crestătură este realizată din carton electrotehnic (prespan), lateroit sau folie combinată pentru clasa B. Pentru clasa de izolație F se folosește, de asemenea, folie combinată de clasă F. Pentru mașinile cu tensiunea peste 1 kV se folosește preșpan, leteroid sau folie combinată corespunzătoare clasei de izolație, principalul rol fiind acela de protecție mecanică.

În anumite situații justificate de existența unor dificultăți tehnologice, izolația de crestătură poate să lipsească.

d) Pana, izolația sub pană, izolația la baza crestăturii

Pana crestăturii, izolația sub pană și izolația la baza crestăturii sunt dimensionate mai ales din punct de vedere al solicitărilor mecanice care se exercită asupra conductoarelor. Rolul principal al acestor componente este acela de a fixa conductoarele în interiorul crestăturii reducând cât mai mult jocul acestora. Alegerea acestor părți ale sistemului de izolație trebuie făcută ținând cont de solicitările mecanice care există atât în funcționarea normală a mașinii dar și în cazul apariției unor defecte. În cazul unui scurtcircuit, intensitatea curentului care străbate înfășurările este de câteva ori mai mare decât valoarea nominală și datorită factorului I^2 care apare în ecuația (1.3), forțele magnetice care se exercită în astfel de cazuri sunt foarte importante [8].

Pentru clasa B, izolația la baza crestăturii se realizează din preșpan, leteroid sau micanită flexibilă. În cazul mașinilor din clasa F se utilizează sticlotextolitul și micanita flexibilă. Izolația sub pană se realizează din sticlotextolit. Pana este fabricată din lemn fiert în ulei, pertinax, sticlotextolit sau lemn densificat în cazul mașinilor din clasa de izolație B sau din sticlotextolit și rășină epoxidică armată cu fibre de sticlă pentru cele din clasa F.

1.4.2.2. Sistemele de izolație ale înfășurărilor rotorice

În raport cu sistemele de izolație utilizate în construcția statoarelor, schemele de izolație ale rotoarelor mașinilor electrice sunt realizate pornind de la faptul că solicitările electrice sunt inferioare celor din stator (valorile tensiunilor din înfășurările rotorului sunt cu mult mai reduse față de cele din stator), iar eforturile mecanice care se exercită asupra înfășurărilor sunt mai mari. O situație deosebită se întâlnește în cazul rotoarele turbogeneratoarelor de puteri foarte mari, care, din cauza vitezelor de rotație ridicate trebuie să suporte solicitări mecanice foarte importante (pentru aceste mașini, miezul magnetic rotoric este realizat din oțeluri speciale, cu proprietăți mecanice superioare). În consecință, în componența sistemelor de izolație ale rotoarelor se găsesc materiale organice și/sau anorganice cu

proprietăţi termice bune şi care conferă o rezistenţă mecanică comparabilă cu cea a înfăşurărilor (cuprului) şi a miezului magnetic. De aceea, dimensionarea acestor sisteme de izolaţie este limitată mai mult de solicitările termice şi mecanice. De asemenea, nu trebuie pierdut din vedere faptul că în regimurile de funcţionare permanente, înfăşurările rotorice (alcătuite din conductoare sau bare de cupru) sunt parcurse, în marea majoritate a cazurilor, de un curent continuu (în cazul maşinilor electrice sincrone) sau de un curent alternativ de foarte joasă frecvenţă (în cazul maşinilor de inducţie).

Un caz cu totul aparte în rândul maşinilor electrice cu o arie largă de utilizare, îl constituie maşinile asincrone cu rotorul în colivie. Rotoarele acestora nu conţin sisteme de izolaţie, barele coliviei fiind încastrate direct în miezul rotoric.

Ţinând cont de cele prezentate anterior, solicitările care se exercită asupra sistemelor de izolaţie ale rotoarelor pot fi grupate astfel:

- solicitări termice datorate în principal pierderilor Joule din înfăşurările rotorice;
- solicitări mecanice foarte importante datorate, în cea mai mare parte, forţelor centrifuge care se exercită asupra înfăşurărilor;
- solicitări electrice (în general, acestea sunt reduse deoarece valorile tensiunilor nu depăşesc în majoritatea cazurilor 1000 V); în cazul sistemelor statice de excitaţie realizate cu tiristoare, supratensiunile de comutaţie conduc la apariţia descărcărilor parţiale;
- abraziune, solicitare datorată obiectelor prezente accidental în interiorul maşinilor electrice (sau fragmentelor desprinse din părţile aflate în mişcare) care poate conduce la deteriorarea severă a izolaţiei şi la apariţia scurtcircuitelor;
- dilatarea şi contractarea barelor de cupru de fiecare dată când maşina electrică este pusă în funcţiune, respectiv oprită; dilatarea şi contractarea conductoarelor de cupru conduc la solicitări de abraziune şi/sau la deformarea conductoarelor şi, în consecinţă dezlipirea izolaţiei şi apariţia cavităţilor cu aer.

Sistemele de izolaţie utilizate în cazul rotoarelor sunt în concordanţă cu tipul maşinii, puterea şi tensiunea acesteia, turaţia, sistemul de răcire, etc.

În general schemele de izolație sunt constituite din izolația crestăturii, izolația conductoarelor (sau a spirelor), izolația capetelor frontale ale bobinelor și, acolo unde este cazul, izolația colectorului.

În cazul mașinilor de puteri mici, înfășurările rotorice sunt realizate din conductoare rotunde de cupru acoperite cu emailuri. Deseori, la mașinile de joasă tensiune, izolația conductoarelor poate prelua și rolul izolației de crestătură, în timp ce, în cazul mașinilor de tensiuni mai mari, înainte de introducerea bobinelor, în crestăturile rotorului este montată izolația de crestătură. Uneori, pentru realizarea izolației de crestătură la rotoarele mici este utilizat și un alt procedeu bazat pe pulverizarea electrostatică a unor pulberi polimerice care aderă foarte bine la miezul magnetic.

Materialele electroizolante utilizate pentru fabricarea acestor sisteme de izolație sunt alese în funcție de clasa de izolație, tensiunea și puterea mașinii. În general, pentru mașinile de puteri mici și medii, izolația de crestătură se realizează din diferite filme polimerice (hârtie *Nomex*, nailon, poliamide, izolația DMD produsă de compania *Dupont*). La mașinile de puteri mari sunt utilizate compozite pe bază de mică, hârtie kraft, sticlă și rășini polimerice (poliesterice și epoxidice) care permit preformarea izolației (realizarea unor teci izolante) înainte de introducerea în crestătură.

Majoritatea hidrogeneratoarelor și motoarelor sincrone cu puteri de peste 50 MW au rotoare cu poli aparenți. Pentru aceste mașini sunt utilizate două modalități de dispunere a înfășurărilor. Astfel, la generatoarele mai vechi sau la mașinile de puteri mai mici înfășurarea (în general realizată din conductor de cupru profilat) este dispusă în jurul polilor în mai multe straturi. În această variantă constructivă, între miezul magnetic polar și bobină se dispune o teacă izolantă realizată din materiale cu proprietăți mecanice foarte bune. La mașinile de puteri mai mari (și 1200 *rpm*) bobinele sunt realizate pe șablon din bandă subțire de cupru. Fiecare bandă de cupru este izolată față de celelalte și bobinele sunt impregnate înainte de fixarea lor pe pol. Conductoarele cele mai apropiate de miezul magnetic polar au o izolație suplimentară realizată cu ajutorul unor benzi preimpregnate. Cele mai utilizate izolații sunt realizate din compozite pe bază de mică, rășini epoxidice și vinil-alchidice, fibre de sticlă, etc.

1.4.3. Cabluri de energie

Cablurile de energie reprezintă categoria cea mai răspândită dintre echipamentele utilizate în transportul şi distribuţia energiei electrice. Fabricarea acestora a început în ultima parte a secolului al XVIII – lea odată cu dezvoltarea iluminatului electric în marile oraşe din Europa şi America de Nord. La un moment dat, reţelele electrice aeriene au devenit atât de numeroase încât, în anumite locuri, au apărut în foarte scurt timp probleme tehnice şi estetice deosebite. Ca urmare, în 1884 la New York a intrat în vigoare o lege care impunea dezafectarea liniilor aeriene din interiorul oraşului şi înlocuirea acestora cu cabluri subterane. În anii imediat următori, au fost adoptate legi similare şi în alte oraşe, astfel încât liniile de transport şi distribuţie subterane au devenit o alternativa viabilă şi au început să fie introduse pe scară largă [13,17].

În anul 1881 au fost fabricate primele cabluri cu izolaţie din cauciuc vulcanizat. O soluţie foarte interesantă adoptată în aceasta perioadă de început se referă la cablurile de energie realizate sub forma unor conducte în interiorul cărora erau dispuse conductoare de cupru izolate şi fixate cu ajutorul unor izolatoare de sticlă sau porţelan (această soluţie a fost utilizată pe scară largă la Paris, în anul 1889) [17].

Primele cabluri de energie cu izolaţia realizată din hârtie – ulei şi tensiunea nominală de 10 kV au fost fabricate de *Ferranti* în anul 1890 şi folosite un an mai târziu în reţelele electrice din Londra. Deşi fabricate în epoca de pionierat, conform datelor publicate, aceste cabluri s-au dovedit atât de fiabile încât ultimul tronson a fost scos din serviciu şi înlocuit abia în anul 1933.

Dezvoltarea reţelelor de cabluri subterane în marile oraşe a fost foarte rapidă (de exemplu, în anul 1909, în Chicago reţeaua de cabluri subterane se întindea pe o lungime de aproximativ 650 km).

Apariţia şi dezvoltarea petrochimiei a permis, la jumătatea secolului al XX-lea, fabricarea cablurilor cu izolaţie polimerică extrudată, mai fiabile şi mai uşor de montat decât cablurile cu izolaţie din hârtie impregnată. Dezvoltarea tehnologică şi descoperirea unor materiale cu proprietăţi superioare a dus la fabricarea cablurilor criorezistive şi supraconductoare

considerate ca fiind o soluție eficientă pentru transportul energiei electrice de mare capacitate.

Din punct de vedere constructiv, cablurile de energie se împart în două mari categorii: cabluri cu izolație din hârtie impregnată și cabluri cu izolație extrudată (polimerică). În funcție de natura curentului electric care străbate conductoarele, există cabluri de curent alternativ și cabluri de curent continuu.

Tehnologiile dezvoltate până în prezent cât și evoluția continuă a materialelor electroizolante permit realizarea unei palete foarte largi de cabluri de energie și date; structura acestora și izolațiile folosite sunt în strânsă legătură cu domeniul de utilizare.

1.4.3.1. Cabluri cu izolație hârtie – ulei

Produse pentru prima dată de *Feranti* și *Callendar Cables* din Anglia la începutul anilor 1890, aceste cabluri au izolația realizată din hârtie înfășurată (*belted cables*) impregnată cu ulei mineral (la început, pentru impregnare a fost folosit colofoniul și uleiul de castor, mult mai târziu fiind utilizat uleiul mineral) [17].

Așa cum a fost subliniat și mai sus, îndelungata experiență de exploatare a cablurilor cu izolație hârtie-ulei a arătat o fiabilitate extrem de mare a acestora, uneori, durata de exploatare depășind 65 de ani.

În ceea ce privește construcția acestor cabluri, în perioada premergătoare Primului Război Mondial, cablurile izolate cu hârtie impregnată erau realizate, în general, cu trei conductoare și aveau tensiuni nominale de până la 25 kV (fig. 1.17). În special datorită distribuției neuniforme a solicitărilor electrice dar și golurilor existente în izolația principală, nivelul descărcărilor parțiale în aceste cabluri era ridicat. Această problemă a fost însă rezolvată în parte prin introducerea unor ecrane individuale pentru fiecare conductor în parte, realizate din banda de cupru și conectate la masă. În timp, forma conductoarelor folosite în construcția cablurilor cu izolație hârtie-ulei a fost modificată în scopul creșterii factorului de umplere, reducerii dimensiunilor și diminuării greutății și cantității de materiale necesare, rezultând, în afara de cablurile cu

conductoare rotunde şi cabluri cu conductoare ovale sau sub formă de sector de cerc (fig. 1.17) La aceste cabluri, conductoarele izolate sunt asamblate împreună cu o masă de umplutură formată din iută sau hârtie, acoperite cu straturi de hârtie preimpregnată şi protejate cu ajutorul unei mantale din plumb, aluminiu sau polimeri. În cazul cablurilor supuse unor solicitări mecanice intense sunt prevăzute armături realizate din bandă de oţel [17].

a *b* *c*

Fig. 1.17. Cabluri cu izolaţia hârtie – ulei cu trei conductoare (*a* – conductoare rotunde, *b* – conductoare ovale, *c* - conductoare sub formă de sector de cerc).

Utilizarea cablurilor cu izolaţie hârtie-ulei este în continuare de actualitate, acestea fiind încă folosite cu succes în transportul şi distribuţia energiei electrice. Tehnologiile existente azi fac însă posibilă extinderea gamei de tensiuni ale acestor cabluri până la valori mult mai mari ale tensiunii (69 kV).

Pentru creşterea rigidităţii dielectrice şi a performanţelor izolaţiei hârtie-ulei, procedeul de preimpregnare a hârtiei a fost înlocuit cu unul de impregnare globală. De asemenea, au fost realizate şi alte tipuri de cabluri: cabluri cu circulaţie de ulei la presiune joasă şi înaltă (fig 1.18– 1.19 şi cabluri cu circulaţie de gaz (fig. 1.20).

În general, cablurile utilizate în instalaţiile de distribuţie a energiei electrice în gama de tensiuni 1 – 35 kV au izolaţia hârtie-ulei realizată prin procedeul de impregnare globală (uleiul de impregnare are o viscozitate relativ mare). Aceste cabluri sunt realizate cu unul, două, trei sau patru conductoare din cupru sau aluminiu, sub formă de bare sau torsadate. Cablurile cu unul sau mai multe conductoare cu secţiunea de până la

16 mm^2 au în componență numai conductoare cu secțiune circulară. În cazul secțiunilor mai mari, conductoarele pot avea și formă ovală sau de sector de cerc.

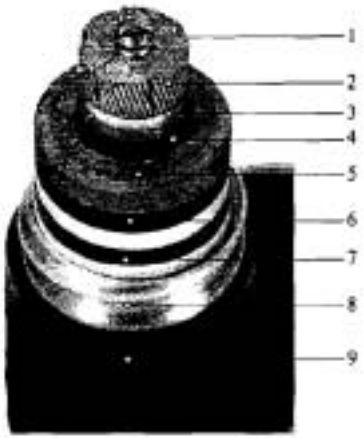


Fig. 1.18. Cablu de înaltă tensiune destinat liniilor de transport a energiei electrice cu izolația din hârtie și circulație de ulei (1 – conductă ulei realizată din bandă de oțel spiralată, 2 – conductor torsadat de cupru realizat din șase segmente, 3 – strat de hârtie, 4 – ecran semiconductor interior realizat din hârtie și negru de fum, 5 – izolație principală din hârtie, 6 – strat semiconductor exterior, 7 – strat realizat din bandă polimerică și bandă textilă, 8 – manta de protecție din aluminiu sau plumb, 9 – manta exterioară realizată din polietilenă).

Datorită distribuției spațiale a câmpului electric, cablurile realizate cu conductoare rotunde și izolație proprie mai sunt numite și cabluri cu câmp electric radial (în cazul conductoarelor cu secțiune rotundă, componenta radială a câmpului electric este cea mai importantă). Cablurile cu conductoare izolate în formă de sector de cerc mai sunt cunoscute și sub numele de cabluri cu câmp neradial. La acest tip de cabluri, solicitările electrice în zonele de contact ale conductoarelor izolate sunt mai intense și ca atare, gama tensiunilor este ceva mai restrânsă (10 kV). Utilizarea cablurilor cu un singur conductor este destul de restrânsă, acestea fiind folosite mai ales la alimentarea cu energie în tracțiunea electrică. Cablurile cu două conductoare sunt utilizate pentru alimentarea rețelelor de curent

continuu şi în instalaţiile monofazate.

Una dintre problemele importante existente în cazul cablurilor a căror izolaţie este realizată din hârtie preimpregnată sau prin procedeul de impregnare globală se referă la migrarea substanţelor de impregnare (uleiului). Aceasta este mai pronunţată în cazul hârtiei impregnate cu uleiuri de viscozitate mică. Din acest motiv, normele de instalare a acestor cabluri prevăd valori maxime ale pantelor. Cablurile pozate vertical sau cu o înclinare pronunţată au izolaţia de hârtie impregnată cu amestecuri speciale a căror viscozitate este mare. Chiar şi în aceste condiţii, mai ales sub acţiunea căldurii rezultate în urma producerii pierderilor Joule, fenomenul de migrare a masei de impregnare este prezent şi poate conduce la apariţia unor zone sensibile în izolaţie („hot spot") [17,18].

Una dintre soluţiile tehnice care a permis realizarea unor cabluri de energie cu tensiuni foarte înalte (de până la 750 kV), propusă încă din anul 1917 şi aplicată pentru prima dată în anul 1928, vizează cablurile cu circulaţie de ulei. Aceste cabluri de înaltă tensiune au în componenţă un singur conductor prevăzut cu un canal central umplut cu ulei şi izolat cu hârtie impregnată cu ulei (fig. 1.18). La capătul unui astfel de cablu este conectat un rezervor de ulei care are rolul de a regla şi menţine presiunea uleiului atunci când temperatura cablului prezintă variaţii (în funcţie de pierderile Joule, creşte în cazul unor curenţii importanţi sau scade în cazul unor puteri vehiculate mici). Unii constructori utilizează vase prevăzute cu o membrana flexibilă ce separă uleiul de o cameră de aer aflat sub presiune. În general, valoarea medie a presiunii statice a uleiului variază, pentru cablurile de înaltă presiune, între 0,1 şi 3 at şi pentru cablurile de joasă presiune între 0,1 şi 1 at.

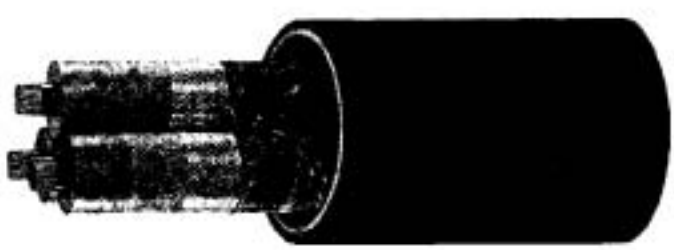


Fig. 1.19. Cablu cu izolaţie de hârtie şi ulei la înaltă presiune [13].

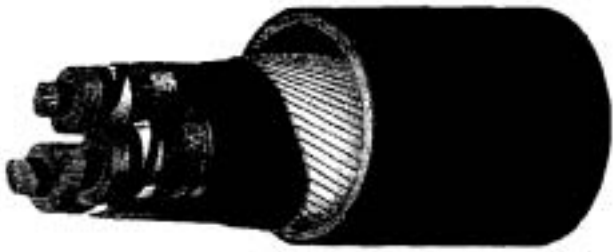


Fig. 1.20. Cablu cu izolație de hârtie și gaz la presiune exterioară [13].

Prin circulația uleiului prin canalul central al cablului o bună parte din căldura rezultată prin producerea pierderilor Joule este evacuată, asigurându-se astfel o temperatură relativ constantă pe lungimea întregului tronson. Solicitările electrice maxime care pot să apară în izolația principală a unui cablu cu circulație de ulei ajung chiar și până la 150 kV/cm (spre comparație, în izolația hârtie-ulei a cablurilor clasice valorile maxime sunt mult mai mici de până la 40 kV/cm). Obținerea unei izolații cu proprietăți dielectrice atât de bune se bazează pe eliminarea incluziunilor gazoase prin utilizarea unor benzi de hârtie foarte subțiri și diminuarea grosimii peliculelor de ulei dintre straturile de hârtie din imediata vecinătate a conductoarelor. Straturile aflate către exteriorul izolației sunt realizate din hârtie mai groasă (și deci mai puțin compactă). Peste izolație este adăugat un ecran de hârtie semiconductoare. Canalul prin care circulă uleiul, care constituie de altfel și funia de conductoare a cablului, este realizat sub formă de spirală din conductor de cupru profilat sau dintr-o bandă de oțel.

Pentru valori ale tensiunii aflate în gama 35-60 kV sunt fabricate cabluri cu trei conductoare aflate într-o manta comună. Canalele cu ulei sunt dispuse în spațiul dintre conductoare și sunt realizate din țevi metalice elicoidale. O altă variantă constructivă se referă la cablurile cu circulație de ulei dispuse în anvelope metalice (fig. 1.19) care pot asigura presiuni ale uleiului de peste 15 at. Aceste cabluri sunt realizate cu conductoare torsadate și sunt dotate cu două straturi semiconductoare interior și exterior separate de izolația hârtie-ulei. La exterior, fiecare conductor este armat cu un strat de bandă metalică perforată sau sârmă semirotundă [17].

Încercările repetate de realizare a unor cabluri izolate cu hârtie-ulei

cu tensiuni superioare valorii de 750 kV au pus în evidenţă necesitatea utilizării unor materiale cu factorul de pierderi mai mic. În anii 1980 au fost produse primele benzi compozite hârtie- polipropilină-hârtie care au permis obţinerea unor izolaţii cu proprietăţi dielectrice superioare. Aceste benzi sunt realizate dintr-un film subţire de polipropilenă plasat între două benzi de hârtie *Kraft*. Factorul de pierderi şi permitivitatea dielectrică a acestor benzi pot fi diminuate prin creştea grosimii filmului de polipropilenă. De exemplu, creşterea conţinutului de polipropilenă de la 42 la 60 % conduce la o diminuare a factorului de pierderi de la 10^{-3} la $7 \cdot 10^{-4}$ şi a permitivităţii dielectrice de la 2,8 la 2,7. În fig. 1.21 este prezentată secţiunea transversală printr-un cablu de 800 kV cu circulaţie de ulei şi izolaţie realizată din bandă compozită hârtie-polipropilenă-hârtie impregnată cu dodecil-benzen.

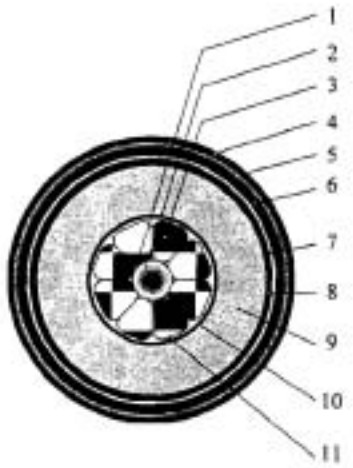


Fig. 1.21. Secţiune printr-un cablu de 800 kV cu izolaţia realizată din bandă PPP (hârtie-polipropilenă-hârtie impregnată cu dodecil-benzen: diametrul canalului de ulei 25 mm, secţiunea conductorului de cupru 2000 mm^2, grosimea unilaterală a izolaţiei 30 mm, grosimea unilaterală a cămăşii de plumb 4,7 mm, grosimea unilaterală a mantalei din polietilenă 7 mm).1- conductă din bandă de oţel spiralată, 2-canal de ulei, 3- conductoare din cupru, 4- manta din PE, 5-strat de ranforsare, 6-cămaşă de plumb, 7-ecran ţesut din fire de cupru, 8-bandă de hârtie şi negru de fum metalizată, 9- izolaţie din bandă hârtie-polipropilenă-hârtie,10- bandă de oţel şi hârtie cu negru de fum, 11- bandă de hârtie *Kraft*.

Izolația hârtie-ulei este folosită, de asemenea, și pentru construcția cablurilor submarine de curent continuu. Tensiunile nominale ale acestor cabluri pot ajunge până la mai multe sute de kilovolți (în mod uzul sunt construite cabluri de curent continuu cu tensiunea de 450 kV – fig. 1.22).

1.4.3.2. Cabluri cu izolație extrudată

Dezvoltarea petrochimiei și a tehnologiilor de fabricare și prelucrare a polimerilor a condus la apariția noilor tipuri de cabluri de energie cu izolație sintetică realizată din poliolefine. Procedeul tehnologic de realizare a izolației se numește extrudare și constă în acoperirea conductoarelor cu un strat continuu de polimer. Principalele materiale folosite sunt polietilena de joasă densitate (PEJD), polietilena de înaltă densitate (PEID) și polietilena reticulată (PER) precum și cauciucul etilen propilenic (EPR), policlorura de vinil (PCV) și cauciucul siliconic, etc.

Cablurile de energie cu izolație extrudată sunt fabricate pentru o gamă de tensiuni foarte mare: cabluri de joasă tensiune utilizate în instalațiile electrice, cabluri de medie și înaltă tensiune folosite în distribuția și transportul energiei electrice și cabluri destinate unor aplicații speciale (minerit, industria petrolieră, cabluri submarine, etc.).

Cablurile cu izolație polimerică extrudată au câteva avantaje majore: nu necesită întreținere, nu prezintă probleme legate de migrarea substanțelor de impregnare (ceea ce determină și eliminarea pericolului de contaminare a mediului), au valorile temperaturilor maxime admisibile mai ridicate decât a acelor izolate cu hârtie-ulei, montarea se face mai ușor și sunt foarte fiabile. Accesoriile necesare acestor cabluri, fie că este vorba de cele destinate conectării segmentelor de cablu sau de terminale au o construcție mai robustă, se montează mai simplu și sunt mai ieftine decât în cazul cablurilor cu izolație hârtie-ulei. Pe lângă aceste avantaje, legate mai mult de partea de exploatare, trebuie remarcat și faptul că procesele de fabricație ale acestor cabluri nu prezintă probleme tehnologice deosebite.

Fig. 1.22. Cablu submarin de curent continuu cu tensiunea de 450 kV şi izolaţia hârtie-ulei (1 – conductor de cupru cu secţiunea de 1600 mm^2, 2-ecran semiconductor interior realizat din hârtie semiconductoare, 3 – izolaţie principală cu grosimea de 19 mm realizată din hârtie impregnată cu ulei de viscozitate mare, 4 – ecran semiconductor exterior realizat din hârtie semiconductoare metalizată, 5 – manta de plumb, 6 – manta din PE, 7 , 8 – straturi metalice de ranforsare realizate din bandă şi sârmă de oţel înfăşurate în sensuri opuse, 9 – strat de bitum, 10 – manta antieroziune realizată din polipropilenă) [19].

Structura acestor cabluri este cu atât mai complexă cu cât tensiunea nominală este mai mare. Primele cabluri de 225 kV cu izolaţie din polietilenă de joasă densitate folosite la liniile de transport a energiei electrice au fost instalate în Franţa în anul 1969. Aceste cabluri au fost dimensionate considerând valorile solicitărilor electrice în izolaţia principală de 100 kV/cm. Prin aceste cabluri se vehicula o putere de 290 MVA (ceea ce corespundea unui curent de 750 A) la o temperatură de 70 °C. În anul 1985 gama de tensiune a cablurilor cu izolaţie din PEJD a fost extinsă la 400 kV (dimensionate la solicitări ale izolaţiei de 120-150 kV/cm), pentru ca în anul 1995 să fie introduse cablurile PEJD cu tensiunea de 500 kV [13,17].

Folosirea polietilenei reticulate a permis creştea cu aproximativ 20°C

a temperaturii maxime de funcţionare a cablurilor de înaltă tensiune. În anul 1976 în Statele Unite a fost construit primul cablu de 138 kV izolat cu PER. Prin îmbunătăţirea structurii ecranelor semiconductoare şi, mai cu seamă, a interfeţei semiconductor-izolaţie şi reducerea numărului de cavităţi din izolaţie prin creşterea presiunii în extruder, valorile tensiunilor nominale ale acestor cabluri au crescut la 230 kV, respectiv 345 kV în anul 1980 (fig. 1.23) [17].

Fig. 1.23. Cablu de energie cu tensiunea de 420 kV şi izolaţie din PER (1– conductor torsadat de aluminiu, 2 - ecran semiconductor interior din PE şi negru de fum, 3 – izolaţie din PER, 4 - ecran semiconductor exterior din PE şi negru de fum, 5- hârtie semiconductoare, 6 – ecran din cupru, 7 – bandă polimerică contra apei, 8 – manta exterioară de protecţie din PE) [19].

În anul 1990, în Japonia a fost instalat primul cablu de 500 kV cu izolaţia din PER. Reticularea polietilenei constă în realizarea unor punţi de legătură între macromoleculele de polietilenă. Acest lucru poate fi efectuat cu ajutorul radiaţiilor α sau β, cu fluxuri de electroni sau pe cale chimică (PERC), prin adăugarea de peroxizi organici. La temperaturi suficient de ridicate, peroxizii se descompun generând radicali liberi care se combină cu hidrogenul din molecule. Pentru efectuarea reticulării, temperatura polimerului trebuie să depăşească valoarea de 150 °C iar valoarea presiunii trebuie să fie suficient de mare pentru a împiedica ieşirea produşilor volatili din polimeri, lucru care conduce la formarea microcavităţilor şi, în consecinţă, la creşterea nivelului descărcărilor parţiale. Tehnologia cea mai

răspândită presupune folosirea unui tub cu vapori de apă a cărui lungime determină viteza de fabricare a izolaţiei cablului. Între presiunea p şi temperatura t *Duperray* a stabilit următoarea expresie empirică [13]:

$$p = k\left(\frac{t}{100}\right)^4, \tag{1.5}$$

unde k este o constantă, p se măsoară în bari şi t în grade Celsius.

Rolul ecranelor semiconductoare este foarte important, ele uniformizând câmpul electric şi reducându-i valorile maxime. Ecranele semiconductoare (interior şi exterior) sunt realizate din polimerul de bază (PEJD, PER, PCV) sau copolimeri amestecaţi cu negru de fum (carbon) pentru a obţine un produs cu o conductivitate electrică cât mai ridicată.

Necesitatea fabricării unor cabluri cu flexibilitate ridicată a condus, la începutul anilor 1960 la utilizarea cauciucului etilen propilenic (EPR). Cablurile cu izolaţie din EPR sunt de regulă, fabricate pentru tensiuni de până la 60 kV. Temperatura maximă de funcţionare a acestor cabluri este aceeaşi ca şi la cablurile izolate cu PER [18].

Experienţa acumulată în exploatare confirmă fiabilitatea extrem de mare a cablurilor extrudate şi performanţele cel puţin la fel de bune ca acelea ale cablurilor cu circulaţie de ulei. Printre fenomenele nedorite care au fost puse în evidenţă în izolaţia cablurilor de tensiuni foarte înalte (utilizate la liniile de transport) sunt arborescenţele de apă şi arborescenţele electrice. Formarea acestora în izolaţia polimerică a cablurilor de tensiuni înalte şi foarte înalte pot conduce, în timp, la apariţia fenomenului de străpungere. Pe de altă parte, proprietăţile dielectrice remarcabile ale polietilenei, printre care amintim factorul de pierderi redus, permit obţinerea unor linii de transport a energiei electrice foarte eficiente pe distanţe relativ mari, caracterizate de existenţa unor pierderi totale reduse.

Cablurile folosite în reţelele de distribuţie a energiei electrice, numite şi cabluri de distribuţie, sunt fabricate pentru valori ale tensiunii de până la 35 kV. Primele cabluri extrudate din acest segment aveau izolaţia realizată din cauciuc butilic (1950) şi sau impus în raport cu cablurile cu izolaţie hârtie-ulei datorită flexibilităţii mai mari şi a uşurinţei de instalare. O altă categorie de cabluri sunt cele izolate cu PCV, cu unul, trei sau patru

conductoare (fig. 1.24-1.25). Foarte rapid însă, polietilena s-a impus ca fiind un material cu proprietăţi superioare ceea ce a condus la fabricarea cablurilor de distribuţie cu izolaţie din PE. Primele cabluri au fost izolate cu PEJD cu masă moleculară mare, un polimer termoplastic cu temperatura de înmuiere de 105 °C. Valoarea maximă a temperaturii de funcţionare a

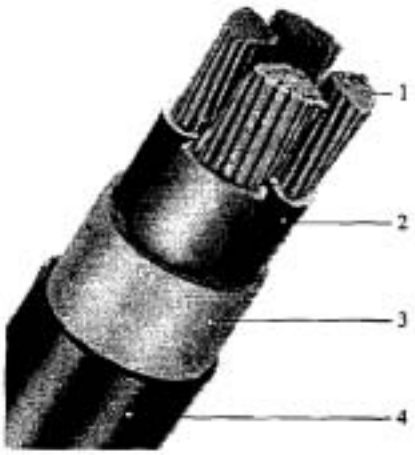


Fig. 1.24. Cablu de distribuţie cu patru conductoare sub formă de sector de cerc, tensiunea de 3,6/6 kV şi izolaţie din PCV (1 – conductor torsadat de cupru, 2 – izolaţie din PCV, 3 – umplutură extrudată din PEJD, , 6 – Manta din PCV).

Fig. 1.25. Cablu de distribuţie cu trei conductoare sub formă de sector de cerc, tensiunea de 3,6/6 kV şi izolaţie din PCV (1 – conductor torsadat de aluminiu sau cupru, 2 – izolaţie din PCV, 3 – umplutură extrudată , 4 – Izolaţie comună PCV, 5 – armătură din bandă de oţel galvanizată, 6 – Manta din PCV).

acestor cabluri nu depăşea 75 °C. Începând cu anul 1964 au fost realizate cabluri de distribuţie cu izolaţie din PER cu un singur conductor din cupru sau aluminiu (fig. 1.26) sau cu trei conductoare (fig. 1.27). Valoarea maximă a temperaturii de funcţionare a crescut, în cazul acestor cabluri, la 90 °C.

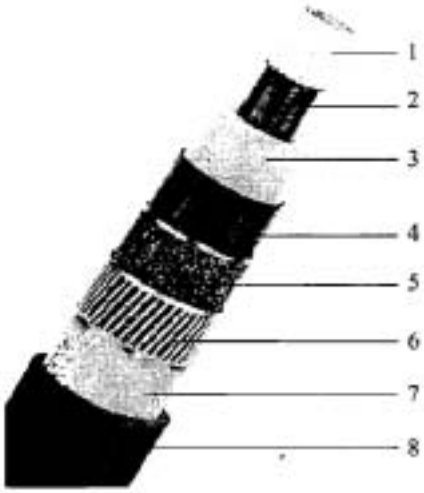


Fig. 1.26. Cablu de distribuţie cu un singur conductor, tensiunea de 6,3/11 kV – 19/33 kV şi izolaţie din PER (1 – conductor torsadat de aluminiu sau cupru, 2 – ecran semiconductor interior, 3 – izolaţie din PER, 4 – ecran semiconductor exterior, 5 – bandă semiconductoare, 6 – ecran din sârmă de cupru, 7 – bandă polimerică, 8 – manta din PE).

Fig. 1.27. Cablu de distribuţie cu trei conductoare torsadate 6/10 kV şi izolaţie din PER (1 – conductor torsadat de aluminiu sau cupru, 2 – ecran semiconductor interior, 3 – izolaţie din PER, 4 – ecran semiconductor exterior, 5 – bandă semiconductoare, 6 – ecran din sârmă şi bandă de cupru, 7 – umplutură extrudată, 8 – manta din PCV).

1.4.3.3. Cabluri supraconductoare

Cablurile supraconductoare sunt destinate liniilor de transport a energiei de foarte mare capacitate. Avantajul major constă în faptul că puterea vehiculată printr-un astfel de cablu poate fi de până la cinci ori mai mare decât în cazul unui cablu clasic, iar pierderile de energie semnificativ mai reduse. Ideea utilizării materialelor supraconductoare la fabricarea

cablurilor electrice a fost propusă încă de la începutul anilor 1960 dar fabricarea lor a întîmpinat dificultăți tehnologice majore.

Este cunoscut faptul că materialele supraconductoare își păstrează starea de supraconductibilitate dacă valorile temperaturii (T), intensității câmpului magnetic (H) și intensității curentului electric (I) nu depășesc anumite valori critice T_c, H_c și I_c. Acesta este motivul pentru care conductoarele acestor cabluri nu pot fi realizate din metale pure, ci doar din aliaje caracterizate de valori critice mari ale mărimilor amintite mai sus. Cele mai mari dificultăți întâlnite în cazul utilizării materialelor supraconductoare sunt legate de sistemele de răcire. Până în anul 1986 compușii supraconductori aveau temperaturi critice care nu depășeau 30 K și care necesitau utilizarea heliului lichid pentru răcire. În tabelul 1.3 sunt prezentate, în ordinea descoperirii, principalele materiale supraconductoare ale căror temperaturi critice sunt inferioare valorii de 30 K.

Tabelul 1.3. Materiale supraconductoare cu temperaturi critice scăzute [2].

Material	T_c [K]	Anul descoperirii
Hg	4,154	1911
Pb	7,196	1913
Nb	9,25	1932
NbC	11,5	1932
NbN	16,1	1941
V_3Si	17,1	1953
Nb_3Sn	18,05	1954
$Nb_3Al_{0,75}Ge_{0,25}$	20,7	1967
Nb_3Ge	23,2	1973
$La_{1,85}Ba_{0,15}CuO_4$	30	1986

În 1977 a fost instalat în Austria unul dintre primele cabluri supraconductore cu o lungime de 50 mm și o singură fază. Tensiunea nominală a cablului era de 60 kV iar partea supraconductoare era realizată din film de niobiu răcit cu heliu lichid. Izolația termică era realizată cu ajutorul azotului lichid, în timp ce izolația electrică consta din straturi de hârtie impregnată cu heliu lichid. Acest cablu supraconductor a fost

menținut în serviciu și supus anumitor încercări până în anul 1979. Concluziile care s-au desprins în urma experienței acumulate în timpul celor doi ani de exploatare au arătat că printr-un astfel de cablu poate fi transmisă o putere cuprinsă între 2 și 3 GW [17].

Practic, realizarea cablurilor supraconductoare cu lungimi mai mari, care nu necesitau eforturi de fabricație și întreținere exagerate, a fost posibilă începând din anul 1986 odată cu descoperea materialelor supraconductoare cu temperaturi critice aflate în vecinătatea pragului de 77 K (supraconductoare la temperaturi înalte - HTS - *high temperature superconductors*). Aceste materiale (Tabelul 1.4) au eliminat o serie de dificultăți tehnologice și au condus la diminuarea substanțială a costurilor sistemelor de răcire (trebuie subliniat faptul că azotul lichid este de aproximativ cincizeci de ori mai ieftin decât heliu lichid). Unul dintre primii compuși supraconductori HTS propus pentru realizarea cablurilor a fost YBCO (ytriu-bariu-oxid de cupru) având temperatura critică în jurul valorii de 90 K. Această valoare s-a dovedit însă prea apropiată față de temperatura azotului lichid (77 K) iar testele efectuate au arătat că în urma apariției unor supracurenți, compusul supraconductor poate trece rapid în stare de conductor normal și, în consecință, este nevoie ca aceste cabluri să fie răcite tot cu heliu lichid (ceea ce antrena o creștere masivă a costurilor specifice de exploatare).

Un alt produs supraconductor utilizat pentru cablurile de energie a fost amestecul $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ cunoscut sub denumirea de BSCCO și având valoarea critică a temperaturii de 110 K. După descoperirea acestui compus a fost elaborată și tehnologia de realizare a matricelor care conțineau filamente supraconductoare BSCCO. Testele efectuate au demonstrat însă că densitatea critică a curentului corespunzătoare acestui compus nu depășește valoarea de 540 A/mm^2 la temperatura azotului lichid, valoare mult prea mică pentru a justifica economic construcția cablurilor de energie.

În prezent există două tehnologii de realizare a cablurilor supraconductoare HTS: cabluri cu izolația electrică aflată la temperatura ambiantă (fig. 1.28) numite cabluri RTDC – *Room Temperature Dielectric Cables*) și cabluri cu izolația electrică aflată la temperatura

supraconductorului (fig. 1.29) simbolizate CDC (*Cryogen Dielectric Cables*) [17].

Tabelul 1.4. Materiale supraconductoare cu temperaturi critice înalte (HTS).

Material	T_c [K]	Anul descoperirii
$YBaCu_3O_7$	93	1987
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	105	1988
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110	1988
$Ti_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	120	1988
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	133	1993
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ (la presiunea de 30 GPa)	164	1994
$Hg_{0.8}Ti_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$	138	1995

Cablurile RTDC prezintă avantajul că izolația electrică poate fi realizată utilizând aceleași materiale și tehnologii ca și la cablurile clasice. Puterile transferate cu ajutorul acestora sunt însă mai mici decât în cazul cablurilor CDC. Printre dezavantajele cablurilor CDC se număra faptul că au o construcție mai complicată, prezintă pierderi de temperatură mai mari și sunt mai scumpe datorită prezenței ecranului supraconductor (fig. 1.29).

La fel ca și în cazul cablurilor clasice, cablurile supraconductoare pot fi realizate cu o singură fază sau cu trei faze. Cablurile trifazate au toate cele trei fazele realizate după aceeași tehnologie RTDC sau CDC și pot avea o așezare triunghiulară sau coaxială a fazelor (fig 1.30 a și b).

În cazul tehnologiei RTDC distanța dintre cele trei faze este aleasă în funcție de intensitatea câmpului magnetic creat de curenți (în funcție de intensitatea curentului distanțele minime pot ajunge până la 0,5 m). Reducerea acestor distanțe conduce la creșterea pierderilor de energie în cablu. Unul dintre principalele avantaje ale cablurilor trifazate coaxiale constă în faptul că răcirea se face printr-un singur canal central prin care circulă azot lichid (fig. 1.30-b) ceea ce conduce la scăderea costurilor specifice de fabricație și întreținere.

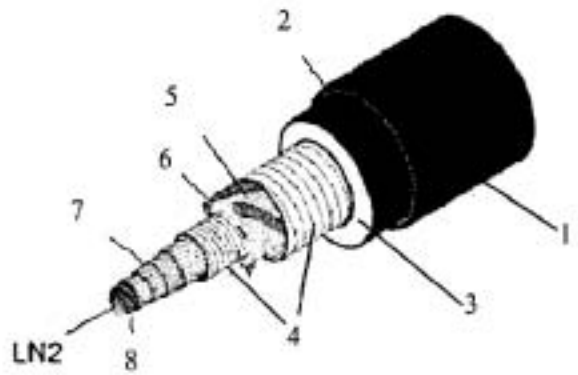


Fig. 1.28. Cablu supraconductor HTS cu dielectricul aflat la temperatura ambiantă RTDC (1 – anvelopă exterioară din oţel, 2 – ecran din cupru, 3 – izolaţie electrică, 4 – izolaţie termică, 5 – izolaţie stratificată, 6 – distanţiere, 7 – bandă supraconductoare înfăşurată pe suport de oţel, 8 – conductă suport realizată din bandă de oţel elicoidală).

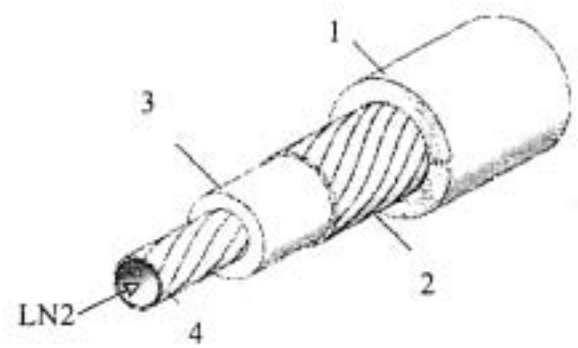


Fig. 1.29. Cablu supraconductor HTS cu dielectricul aflat la aceeaşi temperatură cu supraconductorul CDC (1 – izolaţie termică, 2 –ecran supraconductor, 3 – izolaţie electrică, 4 –bandă supraconductoare înfăşurată pe suport de oţel).

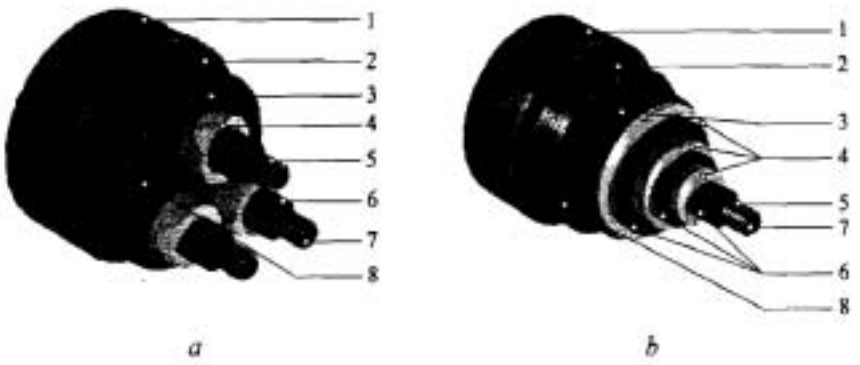


Fig. 1.30. Cabluri supraconductore trifazate HTS - *a* - structură triunghiulară, *b* - structură coaxială (1 –ecran şi manta exterioară, 2 – izolaţie termică, 3 – ecran supraconductor, 4 – izolaţie electrică, 5 – conductă suport realizată din bandă de oţel elicoidală, 6- bandă supraconductoare înfăşurată pe suport de oţel, 7,8 – azot lichid).

1.4.3.4. Accesorii pentru cabluri

Liniile subterane de transport şi distribuţie a energiei electrice sunt realizate, în general, din mai multe segmente de cablu interconectate cu ajutorul unor accesorii speciale numite *manşoane*. De asemenea, conectarea cablurilor la echipamente şi instalaţii se face cu ajutorul *terminalelor*. Rolul principal al acestor accesorii este acela de a asigura etanşarea şi protecţia cablurilor faţă de mediul ambiant.

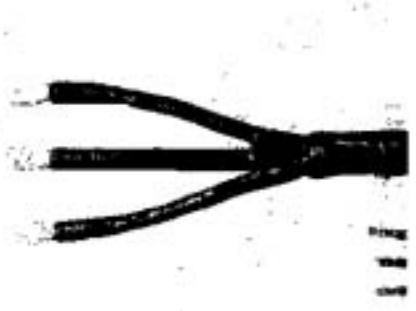
Manşoanele (fig. 1.31) sunt utilizate atât pentru conectarea segmentelor de cablu (atunci când linia electrică are o lungime mare) cât şi pentru repararea cablurilor care au suferit avarii pe anumite porţiuni. De asemenea, manşoanele sunt realizate şi în cutiile de derivaţie subterane în scopul de asigura conectarea altor cabluri. Aceste accesorii trebuie să asigure conectarea părţilor metalice ale cablurilor (conductoare, ecrane sau armături), izolarea acestora şi protecţia zonei de îmbinare împotriva pătrunderii apei sau a altor substanţe.

Fig. 1.31. Manșon de legătură realizat din benzi și tuburi termocontractibile pentru cablu cu izolația sintetică și tensiunea de 12/20 kV.

Terminalele (numite și accesorii de capăt – fig. 1.32) permit conectarea cablurilor de energie la instalații și echipamente electrice. În acest sens, terminalele trebuie să asigure realizarea unor legături galvanice corect executate și, în același timp, etanșarea părții finale a cablurilor.

a

b



c

Fig. 1.32. Terminale pentru cabluri de energie: *a* - terminal pentru cablu 6/10 kV cu izolația din PE, *b* - terminal pentru cablu de 12/20 kV; *c* - terminal de exterior pentru cablu cu tre conductoare și tensiunea 3,6/10 kV.

Materialele folosite pentru fabricarea accesoriilor trebuie să prezinte proprietăţi dielectrice foarte bune, printre care o rigiditate dielectrică mare şi o rezistenţă la curenţii de scurgere pe suprafaţă foarte mare. De asemenea, materialele din care sunt realizate accesoriile de cabluri trebuie să fie compatibile, din punct de vedere chimic, cu componentele cablurilor şi să prezinte proprietăţi mecanice foarte bune (elasticitate mare) şi rezistenţă crescută la deformările termice şi la acţiunea mediului ambiant.

Modul de realizare a manşoanelor şi terminalelor are în vedere, pe lângă punctele enumerate mai sus, asigurarea unei repartiţii convenabile a câmpului electric în scopul evitării unor solicitări electrice locale foarte mari. În interiorul izolaţiei unui cablu câmpul electric este radial şi prezintă o simetrie plan-paralelă în lungul axei conductorului. În regiunile în care ecranul cablului suferă întreruperi, liniile de câmp şi liniile echipotenţiale suferă deformaţii. În zona de capăt a cablurilor, datorită prezenţei muchiilor metalice ascuţite, intensitatea câmpului electric prezintă creşteri foarte importante care conduc la existenţă unor solicitări electrice mari. Pentru reducerea intensităţii câmpului electric sunt folosite trei metode: metoda capacitivă, metoda rezistivă şi metoda de refracţie a liniilor de câmp.

Metoda capacitivă constă în mărirea lungimii liniilor de câmp dinspre ecran spre conductor prin introducerea unui deflector. Metoda rezistivă constă în montarea, la capătul ecranului exterior, a unui rezistor alcătuit din benzi semiconductoare sau tuburi termocontractibile. Accesoriile construite după metoda rezistivă au dimensiuni mai reduse decât cele construite după metoda capacitivă şi sunt utilizate numai pentru cablurile de medie tensiune. Metoda refracţiei liniilor de câmp constă în mărirea locală a capacităţii dintre suprafaţa izolaţiei şi ecranul exterior al cablului, prin dispunerea pe suprafaţa izolaţiei, începând de la ecranul exterior a unor benzi sau tuburi izolante cu permitivitatea cât mai mare. Trecerile izolante obţinute au diametre reduse şi sunt utilizate, în special, pentru cablurile de medie tensiune.

În funcţie de tensiunea nominală şi forma constructivă a cablurilor, accesoriile cablurilor sunt realizate prin trei procedee: termocontractarea la cald, benzi înfăşurate şi alunecare.

Termocontractarea la cald se realizează cu ajutorul unor tuburi

termocontractibile fabricate din poliolefine prin procedeul de extrudare. După extrudare, tuburile se reticulează prin iradiere cu fluxuri de electroni, se încălzesc, se întind și se lungesc. După răcire, tuburile își păstrează starea de tensionare mecanică. În momentul realizării manșoanelor, prin încălzire la 130 °C, tensiunile mecanice dispar, tuburile contractându-se și luând forma și dimensiunile pieselor pe care le izolează. În cazul realizării manșoanelor de legătură, tuburile termocontractibile se folosesc atât ca izolații pentru conductoare cât și ca mantale de exterior pentru protecția împotriva pătrunderii apei. La manșoanele de trecere de la cabluri cu izolație hârtie-ulei la cabluri cu izolație extrudată, cablul cu izolație din hârtie trebuie foarte bine etanșat pentru a nu permite scurgerea uleiului de impregnare și pătrunderea lui în cablul cu izolație sintetică. În acest scop sunt folosite chituri de etanșare rezistente la ulei de cablu, carcase de împărțire a fazelor și tuburi exterioare necesare pentru etanșarea fiecărei faze. Terminalele cablurilor realizate prin acest procedeu au în componență tuburi rezistente la curenți de fugă pe suprafață și la eroziune și benzi izolatoare cu aceleași proprietăți. Numărul renurilor electroizolante (fig. 1.32-b) care se montează separat prin termocontractare, se alege în funcție de valoarea tensiunii nominale a cablului, de lungimea de fugă și de locul de funcționare al terminalului (în exterior sau în interior).

Procedeul de înfășurare a benzilor se folosește la realizarea manșoanelor atât pentru cablurile cu izolație din hârtie cât și pentru cele cu izolație sintetică extrudată de medie și înaltă tensiune. Sunt folosite două tipuri de benzi: benzi conductoare și benzi izolatoare realizate din EPR pentru cablurile cu izolație polimerică și din materiale rezistente la uleiul de cablu pentru cablurile cu izolație de hârtie.

Accesoriile montate prin alunecare sunt, în general, terminale și manșoane pentru cablurile cu izolație sintetică. Terminalele cablurilor de medie și înaltă tensiune au integrate și elemente (renuri) pentru controlul câmpului electric. Unul dintre avantajele accesoriilor montate prin alunecare îl constituie faptul că ele pot fi folosite pentru cabluri cu secțiuni diferite și aceeași tensiune nominală.

1.4.4. Izolatoare electrice

Izolatoarele electrice reprezintă ansambluri care permit fixarea și ghidarea conductoarelor și subansamblurilor mașinilor, instalațiilor și echipamentelor electrice. Pe lângă rolul de fixare mecanică, izolatoarele electrice trebuie să asigure izolarea electrică a componentelor instalațiilor și echipamentelor aflate la potențiale electrice diferite. În funcție de solicitările care se exercită asupra izolatoarelor, deosebim două categorii importante:

- izolatoare care sunt supuse predominant unor solicitări mecanice mari atât în timpul cât și în afara funcționării echipamentului sau instalației; acestea sunt *izolatoarele de suspensie* și *izolatoarele suport*;
- izolatoare supuse mai ales unor solicitări electrice intense; acestea reprezintă în cele mai multe situații părți componente ale mașinilor, echipamentelor, posturilor de transformare și stațiilor electrice și, după caz, se numesc *izolatoare de trecere* sau *borne*.

Toate tipurile de izolatoare enumerate mai sus pot fi montate fie la interior (situație în care se numesc *izolatoare de interior*) fie în atmosferă liberă (caz în care sunt cunoscute sub denumirea de *izolatoare de exterior*). Izolatoarele suport și cele de suspensie se regăsesc cel mai adesea la liniile electrice aeriene (LEA) și au un rol dublu: pe de o parte trebuie să fixeze conductoarele unul față de altul și față de stâlp, iar pe de altă parte trebuie să asigure o izolație corespunzătoare între căile de curent și punctele de fixare a izolatoarelor (care sunt legate la pământ). Izolatoarele suport se mai găsesc în stațiile de transformate, în cuvele aparatelor electrice, în instalațiile capsulate cu SF_6, etc. Izolatoarele de trecere asigură trecerea conductoarelor aflate sub tensiune printr-un perete despărțitor legat la pământ cum ar fi pereții unei stații de transformare, capacul unei cuve de transformator, etc.

Materialele folosite pentru realizarea izolației electrice a izolatoarelor pot fi împărțite în două mari categorii: cele utilizate la izolatoarele clasice cum ar fi sticla și ceramica și cele mai moderne, care s-au impus în ultima perioadă de timp, printre care amintim rășinile epoxidice și cauciucurile siliconice.

1.4.4.1. Izolatoare pentru liniile electrice aeriene (LEA)

Izolaţia liniilor electrice aeriene are două părţi componente de bază. Prima dintre acestea este constituită din aerul atmosferic aflat între conductoarele adiacente ale liniei şi între armăturile metalice de susţinere şi conductoare. Cea de-a doua componentă este constituită din sisteme izolatoare solide care fixează conductoarele de elementele de susţinere montate pe stâlpi: în cazul liniilor de joasă şi medie tensiune sunt folosite izolatoarele suport şi în cazul liniilor de înaltă tensiune sunt folosite izolatoarele de suspensie.

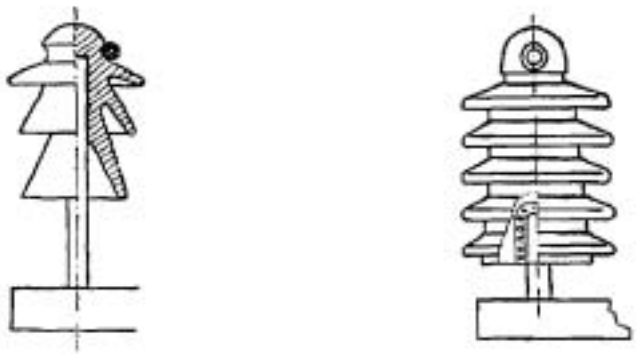
Solicitările care se exercită asupra izolatoarelor LEA sunt atât electrice cât mai ales mecanice. Din punct de vedere electric, izolatoarele LEA sunt supuse, în primul rând, la conturnări datorate mai ales condiţiilor de mediu foarte variate. Fenomenul de conturnare a unui izolator constă în apariţia unui arc electric pe suprafaţa părţii izolante. Acest fenomen produce, pentru un timp scurt, perturbarea funcţionării normale a liniei electrice. Mai mult, în cazul LEA, sunt permise conturnările electrice dar numai acolo unde, după scurtcircuitul trecător, reapar proprietăţile izolante iniţiale. În principal, caracteristicile geometrice ale izolatoarelor urmăresc ca valoarea tensiunii la care se produce conturnarea să fie cât mai mare în raport cu valoarea tensiunii nominale a liniei [3,13].

Din punct de vedere al solicitărilor mecanice, constrângerile legate de dimensionarea acestor izolatoare sunt mult mai importante. Fracturarea unui izolator LEA conduce imediat la scoaterea temporară din serviciu a liniei electrice. Datorită unor defecte mecanice ale izolatoarelor conductoarele liniei se pot deplasa de la poziţia normală, lucru care conduce la scurtcircuite fază-fază sau fază-pământ. Solicitările mecanice exercitate asupra izolatoarelor sunt permanente şi pot prezenta variaţii importante în funcţie de condiţiile de mediu. În cazul vânturilor foarte puternice, a zăpezii sau a gheţii depuse pe conductoarele liniei, solicitările mecanice exercitate asupra izolatoarelor pot creşte de mai multe ori.

b) Tipuri de izolatoare

În cazul liniilor electrice a căror tensiune nu depășește valoarea de 35 kV sunt utilizate izolatoare suport realizate din porțelan și, uneori, din sticlă sau rășini sintetice. Tipul clasic al acestor izolatoare este izolatorul tip „Δ" conturnabil sau neconturnabil (fig. 1.33).

Izolatoarele suport de genul celor prezentate în fig. 1.33 sunt supuse la solicitări mecanice de încovoiere foarte importante, ceea ce impune folosirea unor materiale electroizolante cu proprietăți mecanice foarte bune. Datorită acestor probleme în timp au început să fie fabricate izolatoare suport cu izolația realizată din rășini sintetice (epoxidice), cu rezistență mecanică bună și coeficient de dilatare apropiat de cel al tijei metalice (trebuie semnalat faptul că în cazul izolatoarelor suport realizate din porțelan, variațiile bruște de temperatură – de exemplu succesiunea soare – ploaie - pot conduce la apariția fisurilor părții izolatoare). În afara acestor izolatoare, sunt utilizate din ce în ce mai des izolatoarele compozite a căror construcție va fi prezentată în §1.4.4.2.



a *b*

Fig. 1.33. Izolatoare suport pentru liniile electrice de joasă și medie tensiune realizate din porțelan electrotehnic. *a* - izolator suport tip „Δ" conturnabil și *b* - izolator suport tip „Δ" neconturnabil [3].

În construcția LEA de înaltă tensiune (peste 100 kV) sunt folosite în exclusivitate izolatoarele de suspensie cu izolația realizată din porțelan sau sticlă călită. Acestea se împart în două categorii: *izolatoare tip capă – tijă*

realizate din porţelan sau sticlă (fig. 1.34) care pot rezista la solicitări de comprimare şi forfecare şi *izolatoare tip tijă* care pot fi solicitate şi la întindere (fig. 1.35). Izolatoarele tip capă-tijă sunt realizate din mai multe segmente („farfurii"), fiecare dintre acestea fiind dotat cu o tijă metalică cu nucă cimentată în interiorul părţii izolante şi capa care cuprinde capul izolatorului. În funcţie de tensiunea liniei, sunt confecţionate lanţuri de izolatoare prin fixarea mai multor segmente capă-tijă. Experienţa de serviciu pune în vedere un avantaj foarte important al lanţurilor de izolatoare capă-tijă: spargerea părţii izolatoare (farfuriei) realizată din sticlă sau porţelan nu conduce la ruperea izolatorului şi desprinderea conductorului. La tensiuni foarte înalte sunt folosite lanţuri de izolatoare tip tijă unite prin intermediul unei tije metalice cu nucă.

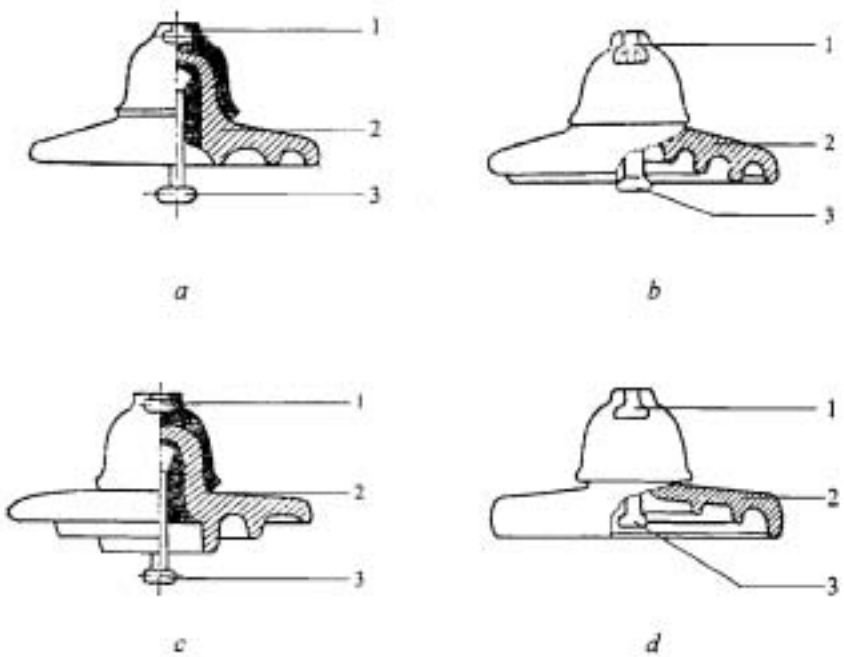


Fig. 1.34. Izolatoare de suspensie pentru LEA tip capă – tijă cu izolaţie din porţelan (*a* şi *c*) şi sticlă electrotehnică (*b* – pentru zone nepoluate şi *d* – pentru zone poluate). 1 – capă, 2 – izolaţie (pălărie din porţelan sau sticlă prevăzută cu renuri), 3 – tijă metalică cu nucă la capăt [3].

În cazul liniilor de tensiuni foarte înalte care sunt amplasate în regiuni caracterizate de fenomene meteorologice mai intense, lanțurile de izolatoare au lungimi caracteristice mai mari. În aceste situații, linia poate căpăta o mișcare de pendulare, care, deseori, conduce la apariția străpungerilor sau conturnărilor. Pentru a reduce acest fenomen sunt montate lanțuri de izolatoare în „V".

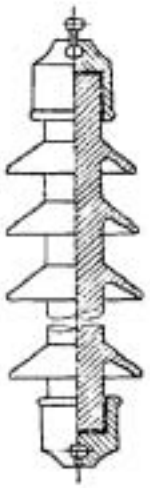


Fig. 1.35. Izolator de suspensie LEA tip tijă lungă [3].

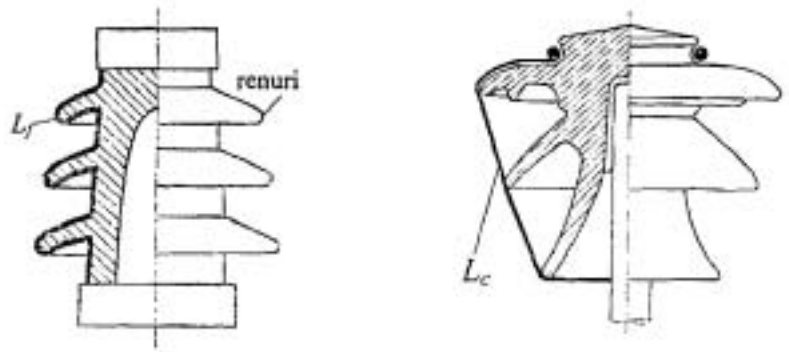
b) Conturnarea izolatoarelor LEA

Fenomenul de conturnare a unei izolații electrice plasată într-un mediu gazos face parte dintr-o categorie aparte de descărcări electrice în gaze care se produc la interfața izolator solid – gaz. Experimental se constată că pe suprafață unui material electroizolant solid plasat în aer și supus acțiunii unui câmp electric, apar descărcări electrice nedisruptive la intensități ale câmpului electric sensibil mai mici decât rigiditatea dielectrică a aerului. Cu alte cuvinte, prezența izolatorului solid reduce sensibil rigiditatea dielectrică a mediului gazos. Acest fenomen este cel mai adesea explicat prin prezența, pe suprafața izolatorului, a unor impurități ce nu pot fi îndepărtate (de exemplu molecule de gaz sau de lichide absorbite). Apariția unor diferențe de potențial în acest strat superficial poate determina

ionizarea moleculelor, formarea unor purtători de sarcină și apariția unor curenți de suprafață (numiți adesea și *curenți de fugă*). În vecinătatea electrozilor (mai cu seamă în zonele în care există protuberanțe metalice), datorită intensificării locale a câmpului electric, apar descărcări electrice care se propagă pe suprafața materialului electroizolant. Apariția acestui fenomen este favorizată de existența unui „contact în puncte" între electrod și izolator (existența unor interstiții, adică spații în care se găsește aer). În această situație intensitatea câmpului electric în interstiții crește de ε_r ori unde ε_r reprezintă permitivitatea relativă a materialului electroizolant). Acesta este motivul pentru care, chiar și în cazul unor valori reduse ale tensiunii aplicate electrozilor metalici, în interstiții intensitatea câmpului electric depășește valoarea rigidității dielectrice a aerului și apar descărcări electrice incipiente. Aceste descărcări nu conduc neapărat la conturnarea izolației deoarece căderile de tensiune care au loc ca urmare a descărcărilor micșorează intensitatea câmpului electric.

Tensiunea de conturnare reprezintă valoarea tensiunii aplicate unei izolații pentru care, pe suprafața materialului electroizolant, de la un electrod la celălalt, apare un arc electric (se produce un scurtcircuit). Experimental se poate arăta că tensiunea de conturnare a unei izolații aflate în aer este întotdeauna mai mică decât valoarea tensiunii de străpungere a aerului ambiant care ar fi între electrozii respectivi. De asemenea, se constată că fenomenul de conturnare este influențat de orientarea liniilor de câmp în raport cu suprafața materialului electroizolant. Dacă liniile de câmp sunt perpendiculare pe suprafața izolatorului (componenta tangențială este nulă sau foarte mică) dezvoltarea descărcărilor pe suprafață este slabă. Dacă din contră, liniile câmpului electric sunt paralele cu suprafața materialului electroizolant, apar descărcări pe suprafață și fenomenul de conturnare este favorizat. De aceea, una dintre problemele cele mai importante care intervine în proiectarea și fabricarea izolatoarelor vizează determinarea profilului optim al acestora, astfel încât în condiții de exploatare cunoscute să nu apară conturnări la tensiunii foarte apropiate de tensiunea nominală a liniei. Astfel, suprafețele izolatoarelor LEA nu sunt paralele cu liniile de câmp electric (acesta este motivul pentru care sunt realizate nervuri sau jenuri). În cazul unui izolator electric se definește noțiunea de *linie de fugă*

– L_f - (fig. 1.36 - *a*) care reprezintă distanța parcursă pe conturul exterior al izolatorului de la o armătură la cealaltă. Lungimea liniei de fugă a izolatoarelor este normalizată în funcție de tensiunea de serviciu a liniei și de nivelul de poluare. Conturnarea izolatoarelor nu urmează întotdeauna linia de fugă L_f a izolatoarelor ci alege *distanța minimă de conturnare* L_f (fig. 1.36 – *b*).



a *b*

Fig. 1.36. *a*- Lungimea de fugă L_f pentru un izolator suport, *b* – lungimea minimă de conturnare L_c pentru un izolator suport [3].

Izolatoarele de exterior folosite la LEA trebuie să funcționeze sigur la tensiunea de serviciu a rețelei și la supratensiuni temporare și de comutație nu numai în stare uscată ci și sub ploaie, atunci când o parte a suprafeței este umedă. Acesta este motivul pentru care la proiectarea formei renurilor izolatoarelor LEA se asigură o suprafață uscată chiar dacă picăturile de ploaie cad sub un unghi de 45°. În astfel de situații, izolația este asigurată numai de porțiunile uscate; conturnarea poate să se producă între suprafețele umede ale izolatorului care se comportă ca niște conductoare. Izolatoarele LEA se por umezi pe întreaga suprafață prin depunerea de rouă. În această situație pe suprafață izolatorului ia naștere un *curent de fugă* care produce încălziri locale și evaporarea apei pe anumite porțiuni. Pe zonele uscate se produc căderi de tensiuni importante care determină apariția unor arcuri electrice parțiale. Căldura produsă de aceste arcuri electrice determină extinderea zonelor uscate. Dacă tensiunea

necesară menţinerii arcului electric va creşte mai repede decât căderea de tensiune pe arc (datorită micşorării porţiunii umezite înseriate cu arcul electric) conturnarea izolatorului nu va avea loc. Din contră, dacă căderea de tensiune pe arc este preponderentă, atunci arcul electric se va lungii până la atingerea armăturilor de capete şi conturnarea va avea loc.

Există izolatoare LEA montate în poziţie orizontală pe stâlpii de întindere. Pentru aceste izolatoare ploaia produce umezirea întregii suprafeţe a izolaţiei. În acest caz, rolul nervurilor este acela de a fragmenta şuvoiul de apă care se scurge pe suprafaţa izolatorului. Şi în această situaţie apar arcuri electrice parţiale localizate în zonele în care filmul de apă este mai subţire şi, prin urmare, prezintă o rezistenţă electrică mai mare. Aceste arcuri nu se pot dezvolta în lungime deoarece stratul gros de apă este dificil de evaporat. Astfel se poate explica faptul că valoarea tensiunii de conturnare este mai mare în cazul izolatoarelor poziţionate orizontal.

c) Poluarea izolatoarelor

Poluarea izolatoarelor constă în depunerea pe suprafaţa părţii izolatoare a acestora a anumitor substanţe care favorizează fenomenul de conturnare. În funcţie de zonă, depunerile solide constau în produşi chimici eliberaţi în atmosferă de uzine şi combinate chimice, metalurgice, etc., praf, sare, negru de fum, praf de ciment, funingine, alumină, îngrăşăminte chimice purtate de curenţii atmosferici, etc... Produşii care poluează izolatoarele de exterior se împart în două grupe. Prima dintre acestea grupează substanţele care se dizolvă în apă (ploaie, rouă) şi care duc la formarea unor electroliţi. Straturile dizolvabile în apă se formează, în principal, din depunerile de săruri ale oxizilor de azot şi bioxidului de sulf din atmosferă, din îngrăşăminte chimice, sau din sărurile apei de mare. Cea de-a doua grupă conţine produşii care nu se dizolvă în apă dar care absorb umezeala şi sporesc grosimea stratului de electrolit interior. Datorită acestor depuneri, pe suprafaţa izolatoarelor de exterior se formează, în timp, un strat gros cu o conductivitate electrică care depinde, în principal, de conţinutul de umiditate: pe vreme umedă depunerea se saturează cu apă şi întreaga suprafaţă a izolatorului se acoperă cu o peliculă continuă cu rezistenţă

electrică variabilă. Curentul de conducție care străbate stratul de poluanți va determina, într-o primă etapă, uscarea straturilor mai subțiri. Ca urmare, pe aceste zone se vor produce căderi de tensiuni importante care au ca urmare apariția arcurilor electrice localizate. În funcție de gradul de poluare a izolatorului, arcul electric se poate extinde până la apariția fenomenului de conturnare sau se poate stinge.

Pentru limitarea depunerii straturilor poluante pe suprafețele izolatoarelor de exterior realizate din porțelan, acestea sunt acoperite cu un strat de glazură care facilitează desprinderea ușoară a substanțelor depuse. Trebuie remarcat și faptul că atât izolatoarele din sticlă cât și cele din porțelan au suprafețe hidrofile care facilitează formarea unor straturi de umezeală continue.

La anumite intervale de timp, în funcție de zonă, izolatoarele de exterior sunt curățate cu jeturi de apă. Pentru această operațiune sunt folosite instalații speciale mobile sau fixe.

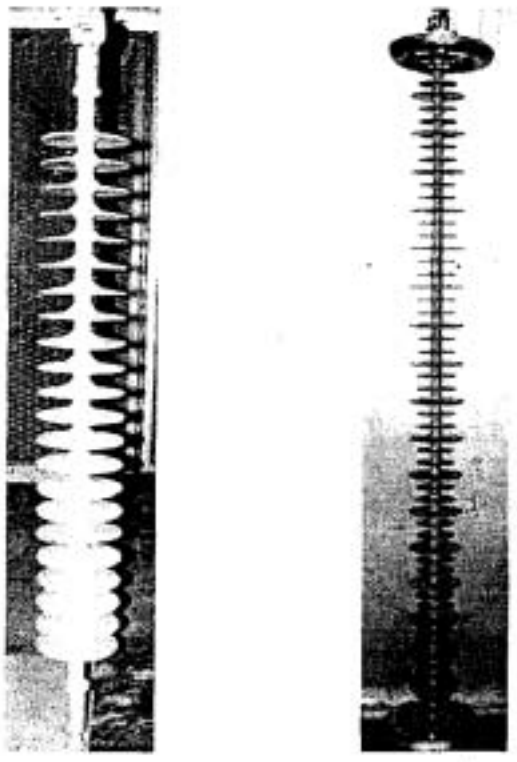
1.4.4.2. Izolatoare compozite

Procesele de fabricație a izolatoarelor clasice realizate din porțelan și sticlă sunt foarte costisitoare, implicând efectuarea unor operațiuni manuale și necesitând consumuri mari de energie. Din această cauză, izolatoarele clasice au costuri de producție relativ mari. O alternativă, din ce în ce mai utilizată, la variantele clasice este reprezentată de *izolatoarele de exterior compozite* realizate din rășini epoxidice ciclo-alifatice și cauciucuri siliconice.

În prezent, izolatoarele compozite sunt fabricate în foarte multe variante constructive și pentru o gamă foarte largă de tensiuni (în mod curent până la tensiuni de 220 kV). Izolatoarele compozite prezintă trei părți componente principale: miezul interior alcătuit dintr-un materiale electroizolant cu proprietăți mecanice foarte bune (rășină epoxidică armată cu fibre de sticlă), izolația exterioară prevăzută cu renuri și realizată de regulă din cauciuc siliconic și armăturile metalice montate la extremități (fig. 1.37 – 1.39). Spre deosebire de izolatoarele clasice, izolatoarele compozite sunt mult mai suple, învelișul exterior prezentând o elasticitate

...e. riscul de deteriorare în timpul transportului sau al montării fiind ...e scăzut. Izolatoarele compozite de tensiuni foarte înalte sunt de până la ...zeci de ori mai uşoare decât izolatoarele din sticlă sau porţelan.

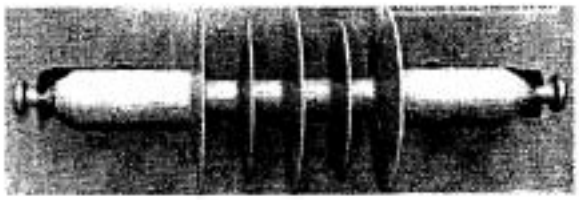
Spre deosebire de porţelan şi sticlă, materialele organice folosite la ...icarea izolatoarelor compozite îmbătrânesc şi se degradează mult mai ...ede. Cele mai grave probleme apar în zonele de capăt, la contactul dintre ...ăturile metalice şi izolaţie. Datorită solicitărilor mecanice variabile, în ...le de fixare a armăturilor metalice apar desprinderi ale stratului izolator ...ior ceea ce poate conduce la infiltrarea apei şi la apariţia unor canale de ...ungere.



a *b*

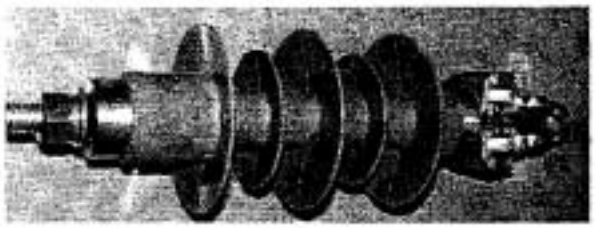
Fig. 1.37. Izolatoare compozite de înaltă tensiune cu învelişul exterior şi renurile realizate din cauciuc siliconic. *a*- izolator compozit pentru LEA cu tensiunea nominală de 110 kV; *b* – izolator compozit pentru LEA prevăzut cu renuri inegale şi tensiunea nominală de 220 kV.

a



b

c



d

Fig. 1.38. Izolatoare compozite de medie tensiune cu învelişul exterior şi renurile realizate din cauciuc siliconic. *a*- izolator compozit de tracţiune cu tensiunea nominală de 36 kV; *b* – izolator compozit de tracţiune cu tensiunea nominală de 24 kV şi renuri inegale, *c* – izolator compozit de tracţiune cu tensiunea nominală de 24 kV şi renuri egale, *d* – izolator compozit suport echipat cu clemă de fixare a conductorului [20].

Pe de altă parte, față de porțelan și sticlă, învelișul exterior al ...atoarelor compozite prezintă o rezistență mult mai redusă la acțiunea ...lui electric. Mecanismele de poluare și de amorsare a arcurilor electrice ... suprafața izolatoarelor compozite sunt aceleași ca și în cazul izolatoarelor ...ice. Încălzirea izolației exterioare conduce la separarea carbonului ...onal, pierderi de material, depolimerizări, etc., fenomene care ...tează fenomenul de conturnare.

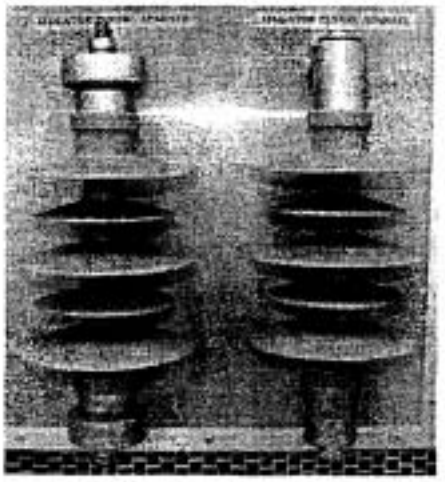


Fig. 1.39. Izolatoare compozite pentru aparate electrice [20].

1.4.4.3. Izolatoare de trecere

Izolatoarele de trecere, numite și borne, au rolul de a asigura ...turile electrice între înfășurările transformatoarelor, generatoarelor, ...densatoarelor și a altor echipamente cu rețeaua electrică exterioară. În ...parație cu izolatoarele prezentate anterior, bornele prezintă un miez ...alic (numit și bolț) care străbate izolatorul de la un capăt la celălalt și un ...em de izolație care are rolul de a izola calea de curent față de exterior.

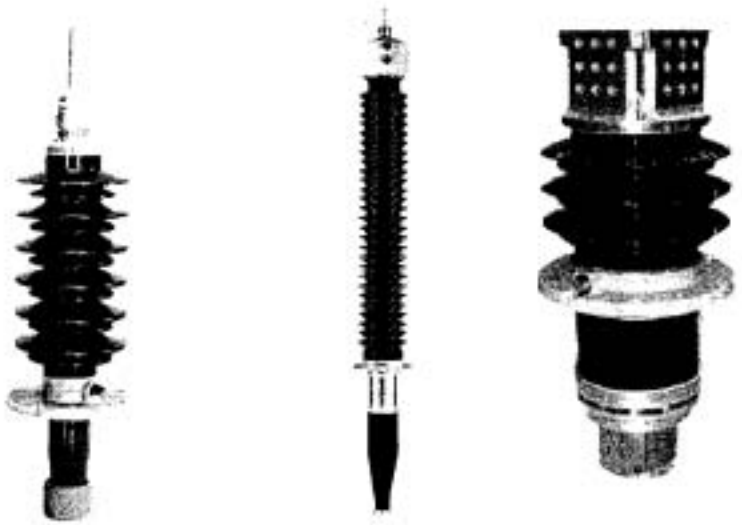
Dimensionarea unui izolator de trecere implică atât dimensionarea ...ului în funcție de intensitatea curentului și de modul de răcire cât și ...ensionarea izolației în funcție de solicitările electrice (intensitatea ...pului electric). Forma bolțului depinde de sistemul de răcire al

echipamentului; în cazul turbogeneratoarelor, căile de curent ale bornelor sunt legate direct la sistemul de răcire al statorului. În general, pentru confecţionarea bolţului este folosită ţeavă de cupru. Dirijarea echipamentului în interiorul bolţului se face prin intermediul unor piese de legătură speciale, realizate din cupru sau materiale electroizonalte [13].

Materialele utilizate pentru realizarea izolaţiei bornelor sunt alese în funcţie de temperatura de lucru a echipamentului (clasa termică). Cele mai utilizate materiale sunt porţelanul, hârtia de condensator, uleiul mineral şi răşinile sintetice. Pentru uniformizarea câmpului electric, în interiorul izolaţiei sunt introduse ecrane conductoare sau semiconductoare.

Bornele echipamentelor electrice prezintă următoarele componente de bază: bolţ, izolaţie electrică, flanşă sau colier de fixare, garnituri de etanşare, ansamblu pentru fixarea garniturilor de etanşare şi sistem pentru dirijarea agentului de răcire. În funcţie de echipamentul deservit sau locul de montaj, există mai multe tipuri de treceri izolante: izolatoare ulei – aer, folosite mai cu seamă în cazul transformatoarelor electrice în ulei, izolatoare ulei – SF_6 utilizate de regulă pentru conectarea transformatoarelor la instalaţii de transmitere a energiei electrice cu SF_6, treceri izolante aer – aer utilizate în staţiile de transformare la traversarea pereţilor metalici, etc. Izolaţia principală a bornelor este realizată, în funcţie de echipamentul deservit şi clasa de izolaţie, din hârtie impregnată cu ulei, hârtie impregnată cu răşini sintetice şi răşini epoxidice armate cu fibre de sticlă. Cămaşa exterioară (inclusiv renurile) este realizată, în funcţie de destinaţia trecerii izolante, din porţelan, răşină epoxidică sau cauciuc siliconic.

Izolatoarele de trecere cu izolaţie hârtie – ulei pot fi utilizate pentru o gamă de aplicaţii foarte largă şi pentru tensiuni de până la 800 kV. Datorită problemelor legate de migrarea uleiului de impregnare, în general, aceste izolatoare sunt montate la unghiuri care nu depăşesc 30° - 45°, faţă de verticală, în funcţie de varianta constructivă. Caracteristicile geometrice depind de valoarea tensiunii de lucru dar şi de valoarea intensităţii curentului electric care străbate trecerea izolantă (fig. 1.40). Temperatura maximă de funcţionare a bornelor cu izolaţie hârtie-ulei este în jurul valorii de 100 °C.



a *b* *c*

Fig. 1.40. Treceri izolante aer-ulei ABB pentru transformatoare electrice (*a* –trecere izolantă 52 kV – 300 kV pentru curenţi slabi şi cămaşa exterioară realizată din porţelan, *b* – izolator 300 kV pentru curenţii intenşi şi învelişul exterior realizat din porţelan, *c* - izolator 36 kV - 25 kA cu exteriorul din porţelan) [21].

Izolaţia hârtie-ulei este folosită şi la realizarea trecerilor izolante ulei-ulei sau ulei – SF_6 (fig. 1.41) pentru tensiuni cuprinse în intervalul 200 - 800 kV. Construcţia acestor izolatoare este mai complexă, în general ele fiind dotate cu un sistem de expansiune a uleiului, ceea ce le permite funcţionarea în orice poziţie. În cazul izolatoarelor de tensiuni foarte înalte pot fi montate şi sisteme de monitorizare a presiunii uleiului care permit evaluarea stării de funcţionare şi preîntâmpină apariţia avariilor.

O altă categorie de treceri izolante sunt cele care au izolaţia principală realizată din hârtie impregnată cu răşini sintetice. Spre deosebire de izolatoarele echipate cu sistemul de izolaţie hârtie-ulei, acestea nu prezintă probleme legate de migrarea masei de impregnare, purtând fi instalate în orice poziţie. Prin polimerizarea răşinilor epoxidice utilizate la impregnarea hârtiei, rezultă o izolaţie solidă cu proprietăţi electrice şi

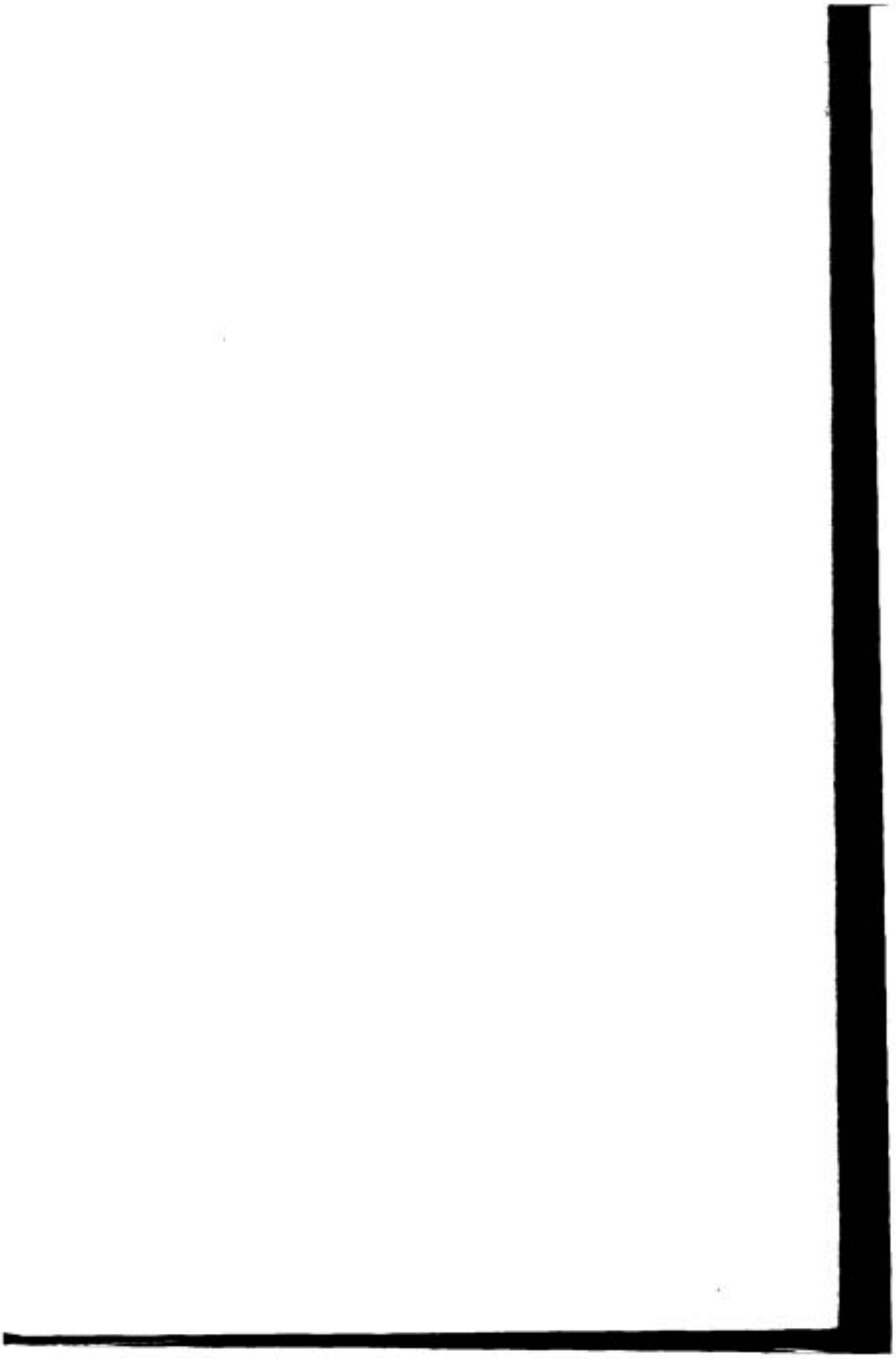
Fig. 1.41. Izolator de trecere ulei-SF_6 ABB cu tensiunea de 550 kV și izolația hârtie-ulei [21].

a *b*

Fig. 1.42. Izolatore de trecere ABB cu izolația realizată din hârtie impregnată cu rășină epoxidică (*a* – treceri aer-ulei 170 kV, 2 kA, *b* – trecere ulei-SF_6 cu tensiunea de 550 kV) [21].

mecanice foarte bune. Izolația exterioară poate fi realizată, în funcție de destinația izolatoarelor, din porțelan, rășină epoxidică sau cauciuc siliconic.

Izolatoarele aer-ulei cu izolația interioară hârtie-rășină epoxidică și izolația exterioară realizată din cauciuc siliconic sunt fabricate pentru gama de tensiuni 50 – 200 kV și curenți de până la 2,5 kA (fig. 1.42). Același sistem de izolație este folosit și pentru fabricarea izolatoarelor ulei-ulei (cu tensiuni de până la 245 kV), aer-aer (cu tensiuni de până la 150 kV) sau ulei – SF_6 (cu tensiuni de până 600 kV).



2. FENOMENE ASOCIATE CÂMPULUI ELECTRIC ÎN SISTEMELE DE IZOLAŢIE

2.1. Noţiuni generale

În timpul funcţionării maşinilor şi echipamentelor electrice, izolaţiile sunt supuse în permanenţă acţiunii câmpului electric. Prin urmare, în sistemele de izolaţie se produc fenomene legate de deplasări ale sarcinilor electrice libere sau legate (electroni, ioni, molioni). În funcţie de caracteristicile geometrice ale căilor de curent, de impurităţile metalice sau de altă natură prezente în izolaţie, pot exista zone în care câmpul electric este foarte intens, ceea ce poate conduce la apariţia unor fenomene de injecţie de sarcină sau la producerea unor descărcări electrice locale.

În cele ce urmează vor fi prezentate şi analizate principalele fenomene care se produc în sistemele de izolaţie aflate în câmp electric şi la interfaţa metal-izolant: injecţia de sarcină, conducţia electrică, polarizarea şi străpungerea sistemelor de izolaţie.

2.2. Curenţii de absorbţie/resorbţie

Considerăm cazul unui material electroizolant plasat între armăturile de arie A ale unui condensator real (cu dielectricul de grosime g, conductivitate σ nenulă şi permitivitate ε). La aplicarea unei tensiuni treaptă condensatorul absoarbe un curent variabil în timp, a cărui intensitate $i_1(t)$ prezintă patru componente (fig. 2.1) [22]:

$$i_1(t) = i_i(t) + i_p(t) + i_{ac}(t) + i_c(t), \qquad (2.1)$$

în care $i_i(t)$ reprezintă *intensitatea curentului de încărcare a condensatorului* având ca dielectric vidul, $i_p(t)$ - *intensitatea curentului de*

polarizare, $i_{ss}(t)$ – *intensitatea curentului aferent sarcinii spațiale* și $i_c(t)$ – *intensitatea curentului de conducție*.

Componenta $i_i(t) = \varepsilon_0 A \partial E/\partial t$ corespunde *încărcării condensatorului* în absența dielectricului (respectiv, pentru $\varepsilon = \varepsilon_0$) și se anulează foarte repede. Drept urmare, porțiunea crescătoare a curbei $i_1(t)$ (fig.1) nu se înregistrează în măsurătorile uzuale.

Componenta $i_p(t)$ corespunde *fenomenului de polarizare* a dielectricului condensatorului, respectiv unor deplasări spațiale foarte reduse a unui număr foarte mare de sarcini legate (particule sau grupuri de particule constituente ale moleculelor dielectricului) și care își recapătă pozițiile inițiale la anularea tensiunii. Curentul de polarizare $i_p(t)$ se anulează ușor în timp, după aplicarea tensiunii continue U_0.

Componenta $i_{ss}(t)$ corespunde sarcinii spațiale aflate în volumul dielectricului, generate în timpul proceselor tehnologice de fabricație a acestuia (prin fracturarea moleculelor etc.), al proceselor de degradare în exploatare (termică, electrică, mecanică, radiativă etc.), prin injecția de purtători datorată muchiilor nerotunjite și protuberanțelor electrozilor etc. Purtătorii de sarcină sunt fixați datorită defectelor prezente în dielectric și se deplasează în interiorul dielectricului la stabilirea câmpului electric (o parte dintre ei putând ajunge la armăturile condensatorului). Cum aceștia, fie sunt refixați de alte defecte situate îndeosebi la interfețele dintre zonele omogene ale dielectricului, fie ajung la electrozi (concentrația acestora scăzând în timp), curentul $i_{ss}(t)$ se anulează după un anumit interval de timp.

Curentul de conducție $i_c(t) = I_c = A\sigma U_0/g$ (fig. 2.1) se datorează convecției electronilor, golurilor, ionilor și molionilor. Concentrațiile fiecărei specii de purtători de sarcină depinde, printre altele, de natura chimică și de structura fizică a dielectricului condensatorului, existând o conducție preponderentă electronică sau ionică. Această componentă a curentului nu se modifică în timp (de la aplicarea și până la anularea tensiunii) și permite determinarea experimentală a conductivității (rezistivității) electrice a dielectricului.

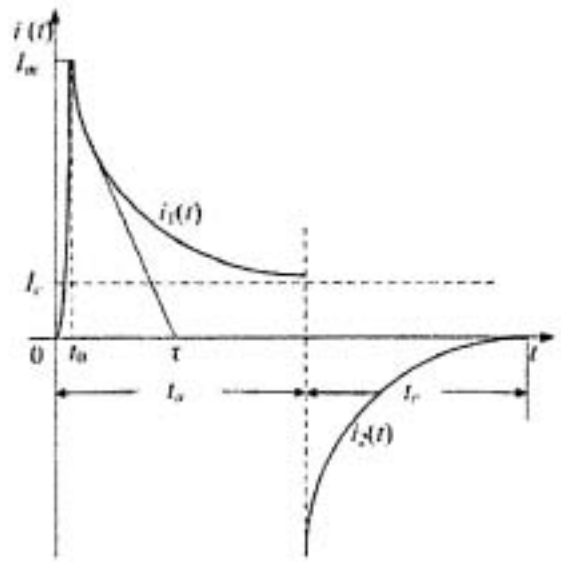


Fig. 2.1. Variaţia în timp a curenţilor prin dielectricul unui condensator real la aplicarea unei tensiuni treaptă (i_1(t)) şi la anularea acesteia (i_2(t)).

Aşa cum se va explica ulterior, printre sursele de purtători de sarcină se remarcă injecţiile de sarcină la electrozi, tunelările bandă-bandă, ionizarea impurităţilor, salturile activate termic etc. Concentraţia acestor purtători este influenţată de intensitatea câmpului electric, de temperatură, radiaţii, umiditate etc.

Prin însumarea componentelor corespunzătoare polarizaţiei şi sarcinii spaţiale se obţine componenta de absorbţie descrescătoare caracteristică dielectricului $i_{abs}(t)$ [22]:

$$i_{abs}(t) = i_p(t) + i_m(t), \tag{2.2}$$

a cărei valoare depinde direct de starea de îmbătrânire a sistemului de izolaţie, în procesul de degradare rezultând atât radicali polari, cât şi purtători de sarcină fixaţi de defecte. Se poate scrie, deci:

$$i_1(t) = i_c(t) + i_{abs}(t) + i_c(t). \tag{2.3}$$

Dacă se decuplează sursa de tensiune continuă (U_0 = 0) şi se scurcircuitează armăturile condensatorului, acesta se descarcă, prin

dielectricul său trecând un curent tranzitoriu $i_2(t)$:

$$i_2(t) = i_d(t) + i_{dp}(t) + i'_{ss}(t), \tag{2.4}$$

în care $i_d(t)$ reprezintă intensitatea curentului de descărcare a condensatorului având ca dielectric vidul, $i_{dp}(t)$ - intensitatea curentului de depolarizare și $i'_{ss}(t)$ - intensitatea curentului corespunzător sarcinii spațiale.

Suma dintre curentul de depolarizare $i_{dp}(t)$ și cel corespunzător sarcinii spațiale $i'_{ss}(t)$ constituie *componenta de resorbție descrescătoare caracteristică dielectricului* $i_{rbs}(t)$:

$$i_{rbs}(t) = i_{dp}(t) + i'_{ss}(t). \tag{2.5}$$

Dacă tensiunea U_0 are valori reduse (sub 1 kV), iar durata de aplicare a acesteia este de ordinul minutelor sau orelor, în cazul sistemelor de izolație uzuale nu se produc transformări importante (degradări chimice notabile) care să modifice concentrația de dipoli electrici sau densitatea sarcinii spațiale. Drept urmare rezultă:

$$\begin{aligned} i_p(t) &= i_{dp}(t) \\ i_{ss}(t) &= i'_{ss}(t), \end{aligned} \tag{2.6}$$

respectiv,

$$i_{abs}(t) = i_{rbs}(t). \tag{2.7}$$

În acest caz se spune că există un *curent de absorbție reversibil.*

Intensitatea curentului de polarizare prezintă valori importante în sistemele de izolație polare și, îndeosebi, a celor pe bază de celuloză aflate în medii cu umiditate ridicată. În aceste cazuri $i_{ss}(t) << i_p(t)$ și se poate scrie $i_p(t) \cong i_{abs}(t)$. Cum și curentul de conducție este relativ redus ($i_c(t) << i_p(t)$), se consideră, pentru $t > t_0$ (fig.2.1), $i_1(t) = i_p(t)$ și se definește *indicele de polarizare* k_p (pentru o tensiune dată U_0):

$$k_p = \frac{I_{60}}{I_{600}}, \tag{2.8}$$

în care I_{60} reprezintă valoarea intensității curentului $i_1(t)$ măsurat la 60 s de

la aplicarea tensiunii continue U_0 şi I_{600} – valoarea intensităţii curentului $i(t)$ măsurată la 600 secunde.

Deoarece apa este puternic polară ($\varepsilon_r = 81$), componenta $i_p(t)$ creşte cu conţinutul de apă din izolaţie, iar mărimea k_p poate fi utilizată pentru caracterizarea „stării de umezire" a sistemelor de izolaţie. Trebuie subliniat însă că utilizarea lui k_p este corectă doar dacă curenţii corespunzători conducţiei ($i_c(t)$) şi sarcinii spaţiale ($i_{ss}(t)$) sunt mult mai reduşi decât cel corespunzător polarizaţiei ($i_p(t)$).

Într-o serie de lucrări curentul de încărcare a condensatorului real $i(t)$ este numit şi *curent de polarizare* sau *curent de absorbţie*, iar variaţia sa în timp se consideră de forma:

$$i_1(t) = I_c + I_a \cdot \exp(-t/\tau). \tag{2.9}$$

2.3. Conducţia electrică

Prin natura fenomenelor care au loc, conducţia electrică în materialele electroizolante şi sistemele de izolaţie prezintă un grad de complexitate ridicat. Aşa cum s-a amintit în paragraful anterior, în funcţie de structura fizico-chimică a dielectricului, purtătorii de sarcină care participă la conducţie sunt electronii, ionii şi molionii. Studiul conducţiei electrice în aceste corpuri implică analiza următoarelor aspecte:

- tipul şi originea purtătorilor de sarcină;
- mecanismele de deplasare a purtătorilor de sarcină în izolanţi.

Nu există un model fizic unic cu ajutorul căruia să poată fi caracterizat fenomenul de conducţie în corpuri. De aceea, analiza acestuia se face pe grupe de materiale, în funcţie de starea de agregare şi de structura acestora. În cazul gazelor şi lichidelor, mecanismele de conducţie şi factorii de influenţă ale acestora sunt cunoscute într-o mare măsură. În izolaţiile solide conducţia electrică este mult mai complexă şi modelele elaborate vizează, în general, anumite grupe de materiale.

Conducţia electrică într-un izolant cu permitivitatea ε şi conductivitatea electrică σ, aflat între doi electrozi metalici, depinde atât de

procesele care se desfăşoară în volumul materialului dar şi de cele care apar la interfaţa metal-izolant (fig. 2.2).

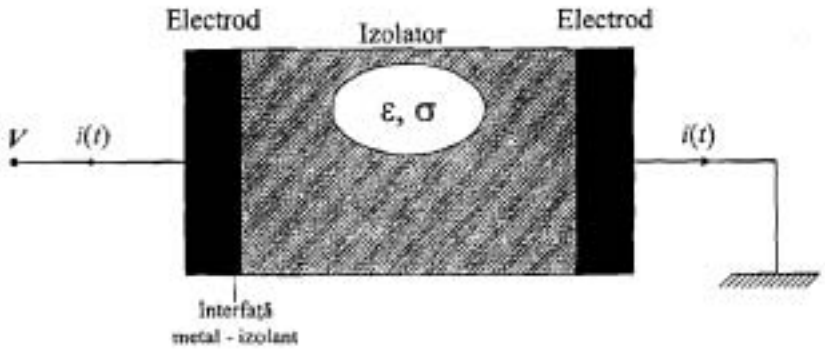


Fig. 2.2. Explicativă pentru fenomenele legate de conducţia electrică în izolatori.

În cele ce urmează se va prezenta o analiză a principalelor fenomene ce determină producerea conducţiei electrice în sistemele de izolaţie.

2.3.1. Fenomene care se produc la interfaţa metal-izolant

Descrierea fenomenelor care se produc sub acţiunea câmpului electric la contactul dintre un electrod metalic şi un izolant, cât şi în volumul izolantului (fig. 2.2), necesită utilizarea unor noţiuni de fizică cuantică referitoare la stările şi energiile particulelor (electroni, nucleoni) constitutive.

Din punct de vedere energetic, electronii care constituie un corp sunt situaţi pe nivelurile unor benzi permise de energie separate de benzi interzise. Valorile energiilor din benzile permise sunt discrete şi relative, astfel încât, pentru a compara energiile corespunzătoare materialelor diferite (de exemplu la interfeţele metal-izolant), este folosit un nivel energetic de referinţă, numit *nivel de vid*. Acesta se defineşte ca fiind energia unui electron imobil care a fost extras complet dintr-un material. *Lucrul mecanic de extracţie* Φ_0 şi *afinitatea pentru electroni* χ (fig. 2.3) reprezintă două mărimi care caracterizează fiecare material în parte. Lucrul mecanic de

extracţie se defineşte ca fiind energia necesară deplasării unui electron de pe nivelul Fermi pe nivelul de vid şi reprezintă energia minimă necesară pentru a extrage un electron dintr-un material aflat la temperatura de 0 K. Afinitatea pentru electroni χ reprezintă energia eliberată atunci când un electron este plasat de pe nivelul de vid pe primul nivel al benzii de conducţie w_c. Afinitatea pentru electroni se mai defineşte ca fiind şi energia eliberată de un electron atunci când este absorbit de un atom neutru. În acest caz se constată că, cu cat χ este mai mare, cu atât electronul absorbit este mai strâns legat de atom.

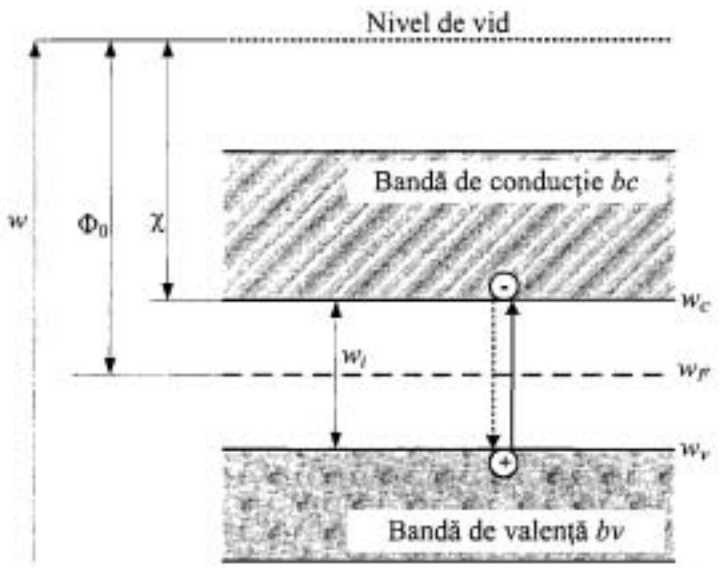


Fig. 2.3. Diagrama benzilor de energie pentru un cristal covalent.

Studiul fenomenelor care au loc la interfaţa metal-izolant şi care în acest caz vizează *injecţia de sarcină* (de electroni) din metal în izolant necesită analiza diagramelor benzilor de energie ale celor două materiale aflate în contact. Acest demers este însă îngreunat de rugozitatea suprafeţelor şi de contactele imperfecte dar şi de impurităţile de natură chimică prezente în zona de separaţie (toate acestea complică forma diagramelor benzilor de energie).

În general, pentru metale este acceptat modelul energetic al lui *Sommerfeld* în care metalul este considerat o groapă de potenţial, de

adâncime finită w_0. La $T = 0$ K electronii prezenți în metal ocupă nivelurile energetice începând cu valoarea cea mai joasă și până la nivelul limită *Fermi* (w_F). În conformitate cu principiul de excluziune al lui *Pauli*, pe fiecare nivel energetic se află maxim doi electroni cu momentul magnetic de spin opus (fig. 2.4). Condiția ca un electron să poată părăsi metalul este ca energia lui cinetică să fie cel puțin egală cu $w_e = w_0 - w_F$.

În cazul unei interfețe metal-izolant, pentru ca electronii să părăsească metalul și să intre în izolator, aceștia trebuie să escaladeze o barieră de potențial a cărei înălțime Φ depinde de proprietățile chimice și fizice ale celor două materiale dar și de caracteristicile interfeței.

Fig. 2.4. Modelul fizic al unui metal (modelul lui *Sommerfeld*).

2.3.1.1. Injecția Schottky

În modelul fizic ce descrie injecția *Schottky* se consideră că bariera de potențial ce caracterizează interfața metal-izolant se modifică ca urmare a acțiunii forțelor electrostatice ce se exercită între electronii injectați și metalul care se încarcă cu sarcină pozitivă. Ca urmare, bariera de potențial dintre metal și izolator (fig. 2.5) se modifică continuu ca urmare a modificării energiei potențiale a electronului.

Considerăm interfața dintre o placă metalică subțire (un electrod metalic) și un material izolant. Pentru calculul energiei potențiale a unui electron ce părăsește placa metalică și trece în izolator, datorită simetriei, electrodul poate fi modelat printr-o sarcină imagine (pozitivă) ce se găsește la aceeași distanța x ca și electronul în spatele plăcii (fig. 2.6).

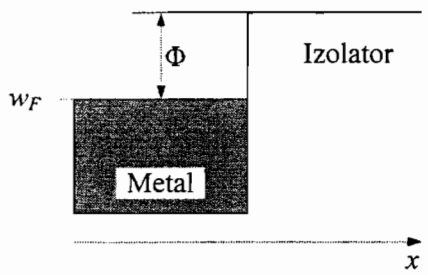


Fig. 2.5. Bariera de potenţial metal-izolant în absenţa câmpului electric.

Forţa de atracţie coulombiană dintre electronul injectat şi sarcina imagine este exprimată prin relaţia:

$$F(x) = \frac{q_0^{\,2}}{4\pi\varepsilon(2x)^2}, \tag{2.9}$$

în care $\varepsilon = \varepsilon_0\,\varepsilon_r$ reprezintă permitivitatea absolută a izolatorului (ε_r este permitivitatea relativă). Energia potenţială a electronului $U_q(x)$ poate fi calculată în ipoteza că acesta se află la o distanţă suficient de mare de suprafaţa metalului (cel puţin câteva constante de reţea). Considerând energia potenţială a electronului egală cu energia necesară deplasării acestuia din punctul de coordonată x, într-un alt punct situat la o distanţă foarte mare, rezultă:

$$U_q(x) = \int_x^{\infty} F(x)dx = -\frac{q_0^{\,2}}{16\pi\varepsilon x}. \tag{2.10}$$

În prezenţa unui câmp electric constant de intensitate E aplicat pe direcţia axei Ox, asupra electronului se va exercita forţa electrică $\vec{F}_e = q_0\vec{E}$, care determină modificarea energiei potenţiale cu termenul (fig. 2.6):

$$U_e(x) = -q_0 Ex, \tag{2.11}$$

ceea ce conduce la următoarea expresie a energiei potenţiale:

$$U(x) = -\frac{q_0^{\,2}}{16\pi\varepsilon x} - q_0 Ex. \tag{2.12}$$

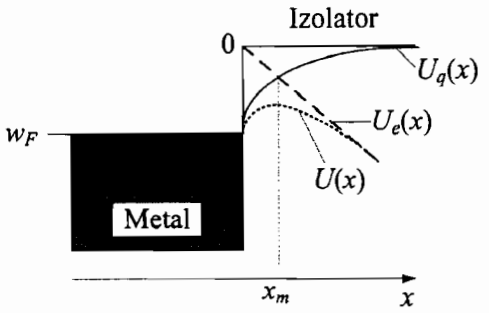


Fig. 2.6. Modificarea barierei de potenţial la interfaţa metal-izolant la stabilirea unui camp electric.

Utilizând expresia (2.12), poate fi calculată înălţimea maximă a barierei de potenţial. Abscisa x_m corespunzătoare înălţimii maxime se obţine pentru acea valoare a lui x pentru care derivata funcţiei $U(x)$ se anulează ($U(x)$ prezintă un maxim):

$$\frac{dU(x)}{dx} = \frac{{q_0}^2}{16\pi\varepsilon x^2} - q_0 E = 0, \tag{2.13}$$

de unde rezultă:

$$x_m = \left(\frac{q_0}{16\pi\varepsilon E}\right)^{1/2}, \tag{2.14}$$

şi

$$U_m = -\frac{q_0}{2}\left(\frac{q_0 E}{\pi\varepsilon}\right)^{1/2}. \tag{2.15}$$

Prin urmare, înălţimea barierei de potenţial pe care electronii trebuie să o escaladeze la trecerea lor din metal în izolator se reduce cu U_m şi devine:

$$\Phi_{ef} = \Phi - \frac{q_0}{2}\left(\frac{q_0 E}{\pi\varepsilon}\right)^{1/2}. \tag{2.16}$$

Obţinerea expresiei densităţii curentului electric J corespunzător injecţiei Schottky presupune determinarea fluxului de electroni care, sub acţiunea câmpului electric, ajung la barieră şi au suficientă energie pentru a o escalada. Pentru aceasta se ţine seama de distribuţia energiei electronilor în metal şi de faptul că electronii care escaladează bariera metal-izolator trebuie să aibă o componentă a vitezei pe direcţia axei Ox suficient de mare astfel încât aceştia să escaladeze bariera şi să nu fie reflectaţi de suprafaţa metalului. Probabilitatea ca un electron să escaladeze bariera de potenţial este de forma:

$$P_{esc} = \mathrm{C} \cdot \exp\left(-\frac{\Phi_{ef}}{kT}\right), \tag{2.17}$$

în care $k = 1{,}38\ 10^{-23}$ J/K este constanta lui Boltzmann şi C reprezintă o constantă.

Ţinând cont de aceste considerente, presupunând că numai o mică fracţiune a electronilor suferă reflexii la suprafaţa metalului (notăm cu $R < 1$ coeficientul de reflexie a electronilor) şi ţinând cont de relaţia (2.17) expresia densităţii curentului electric corespunzător injecţiei este:

$$J = J_T \cdot \exp\left(-\frac{\Phi - \frac{q_0}{2}\left(\frac{q_0 E}{\pi\varepsilon}\right)^{1/2}}{kT}\right), \tag{2.18}$$

$$= J_T \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right) \cdot \exp\left[\frac{q_0}{2kT} \cdot \left(\frac{q_0 E}{\pi\varepsilon}\right)^{1/2}\right]$$

în care $J_T = A(1\text{-}R)T^2$ şi $A = 4\pi q_0 m_0 k^2 / h^3 = 1{,}2 \cdot 10^6\ \mathrm{A/m^2K^2}$ este constanta *Richardson – Schottky* ($m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg este masa electronului şi $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js este constanta lui *Planck*). Notând cu $\beta_S = \frac{1}{2}\left(\frac{q_0^3}{\pi\varepsilon}\right)^{1/2}$ constanta Schottky, $A^* = A(1\text{-}R)$, expresia densităţii curentului electric este [2]:

$$J = A^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{\Phi-\beta_S E^{1/2}}{kT}\right). \qquad (2.19)$$

Studiul experimental al injecţiei *Schottky* presupune trasarea caracteristicii $\ln(J)$ în funcţie de $E^{1/2}$ la T = ct.. Prin logaritmarea expresiei (2.19) rezultă:

$$\ln(J) = \ln(A^{*}T^{2}) - \frac{\Phi}{kT} + \frac{\beta_S}{kT}E^{1/2}, \qquad (2.20)$$

ceea ce înseamnă că variaţia $\ln(J)$ în funcţie de $E^{1/2}$ este o dreaptă de pantă β_S/kT. Ordonata acestei drepte în origine este $\ln(A^{*}T^{2}) - \Phi/kT$. Efectul naturii electrodului poate fi studiată prin trasarea dependenţei $\ln(J/T^2)$ în funcţie $1/T$ la E = ct. Prin împărţirea relaţiei (2.19) cu T^2 şi logaritmare, rezultă:

$$\ln\frac{J}{kT} = \ln A^{*} - \frac{\Phi-\beta_S E^{1/2}}{k}\cdot\frac{1}{T}. \qquad (2.21)$$

Se obţine astfel o dreaptă a cărei pantă este $\left(\Phi-\beta_S E^{1/2}\right)/k$. În anumite situaţii, caracteristicile experimentale pot prezenta abateri datorită neomogentităţilor şi prezenţei sarcinii spaţiale în izolatori.

2.3.1.2. Injecţia Fowler-Nordheim

Injecţia *Fowler-Nordheim* numită şi *tunelare* sau *efectul tunel* apare la interfaţa metal-izolant în cazul câmpurilor electrice foarte intense (de peste 10^9 V/m) atunci când bariera de potenţial corespunzătoare interfeţei se înclină foarte mult şi devine foarte subţire (fig. 2.7) [2]. Considerăm mai întâi cazul unui film electroizolant de grosime d plasat între doi electrozi metalici. Se constată că pentru valori ale lui d inferioare câtorva zeci de angströmi, există anumiţi electroni care „tunelează" bariera de potenţial corespunzătoare filmului electroizolant dintre electrozi (fig. 2.7). Dacă grosimea este mai mare, electronii emişi de electrozi nu mai pot traversa bariera de potenţial.

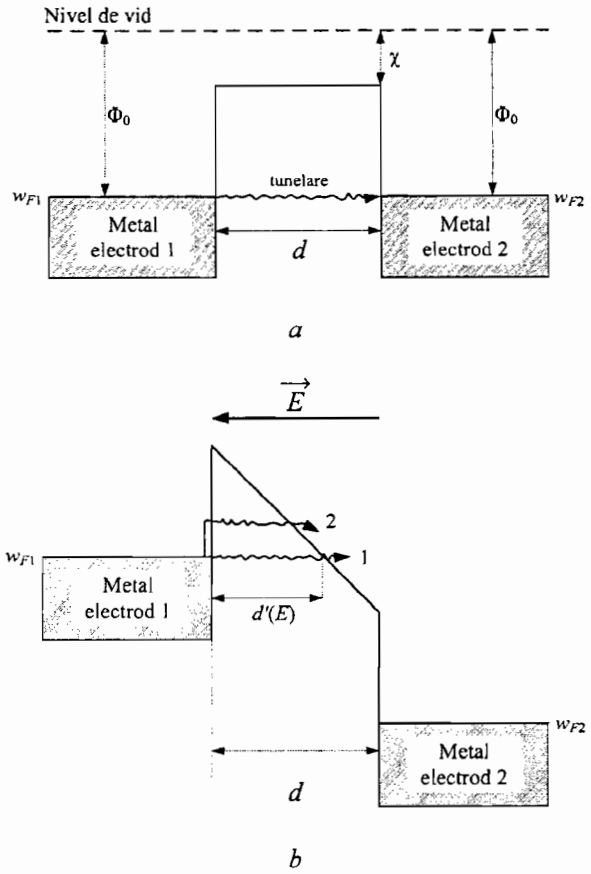


Fig. 2.7. Bariera de potenţial în cazul electrod - film electroizolant – electrod în lipsa câmpului electric (*a*) şi în cazul aplicării unui câmp electric intens (*b*).

Aşa cum se poate observa în fig. 2.7, în cazul aplicării unui câmp electric între cei doi electrozi, bariera de potenţial se înclină foarte mult devenind triunghiulară. La temperaturi obişnuite lungimea pe care un electron ce părăseşte electrodul 1 trebuie s-o „tuneleze" se reduce semnificativ şi depinde de intensitatea câmpului electric: cu cât câmpul este mai intens, cu atât $d'(E)$ este mai mică.

Pentru analiza injecţiei *Fowler-Nordheim* se consideră bariera de potenţial la interfaţa metal-izolant (fig. 2.8) în prezenţa unui câmp electric intens. În cele ce urmează forţele imagine vor fi neglijate şi se vor considera

numai forţele coulumbiene ce acţionează asupra electronilor aflaţi în câmpul E.

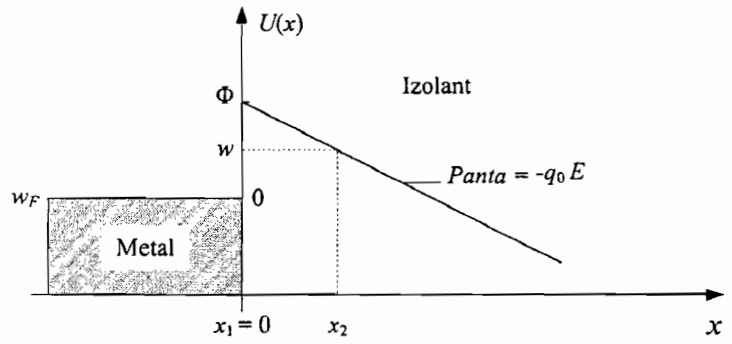


Fig. 2.8. Bariera de potenţial triunghiulară considerată în cazul injecţiei *Fowler-Nordheim*.

Considerând suprafaţa metalului ca fiind definită de planul $x = 0$ (fig. 2.8), în concordanţă cu ipotezele făcute mai sus, energia potenţială corespunzătoare barierei este:

$$U(x) = \begin{cases} 0, & \text{pentru } x < 0; \\ \Phi - q_0 E x & \text{pentru } x > 0. \end{cases} \tag{2.22}$$

Exprimarea densităţii de curent J corespunzătoare injecţiei Fowler-Nordheim presupune determinarea probabilităţii ca un electron incident să treacă prin barieră. Pentru aceasta sunt utilizate noţiuni de fizică cuantică ce vizează fenomenele ondulatorii independente de timp şi anume undele asociate electronilor $\Psi(x)$, care se propagă pe direcţia Ox. În cazul unui electron expresia funcţiei de undă complexe $\Psi(x)$ se obţine prin rezolvarea ecuaţiei lui *Schrödinger*. Menţionăm că $\Psi(x)$ este o funcţie complexă care descrie unda funcţie de poziţie şi nu are semnificaţie fizică. Totuşi $\Psi(x)$ prezintă o proprietate interesantă şi anume faptul că produsul $\Psi \cdot \Psi^*$ (Ψ^* reprezentând conjugata complexă a funcţiei Ψ) reprezintă probabilitatea ca electronul să se găsească între x şi $x + dx$.

În cazul de faţă, forma clasică a funcţiilor $\Psi(x)$ care satisfac ecuaţia lui Schrodinger şi condiţiile pe frontieră este [2]:

$$\Psi(x) = \exp[\alpha(x)], \tag{2.23}$$

în care $\alpha(x)$ reprezintă o funcţie care variază foarte puţin cu x.

Prin urmare, probabilitatea ca un electron să străbată bariera de potenţial este egală cu probabilitatea ca electronul să se găsească în punctul de abscisă x_2, adică [2]:

$$P_{tunelare} = C \cdot \exp[\alpha(x_2)] \cdot \exp[\alpha(x_2)]^*, \tag{2.24}$$

în care C este o constantă. Ţinând cont de valorile $x_1 = 0$ şi $x_2 = (\Phi\text{-}w)/q_0E$ şi considerând expresia energiei potenţiale a barierei (2.22), rezultă o expresie a densităţii de curent [2]:

$$J = A_{FN} E^2 \cdot \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \tag{2.25}$$

în care $A_{FN} = q_0^3 E^2 / 8\pi h(\Phi - w_F)$ şi $B = \frac{4}{3}\left(\frac{2m_0}{h^2}\right)^{1/2} \frac{(\Phi - w_F)^{3/2}}{q_0}$ sunt două constante. Se observă că relaţia (2.25) prezintă o analogie formală cu relaţia (2.19) în sensul că temperatura T este înlocuită, în acest caz, de E.

Prin logaritmarea relaţiei (2.25) poate fi trasată caracteristica $\ln(J_{FN}/E^2) = f(1/E)$ care permite obţinerea lucrului mecanic de extracţie a electronilor din metal.

2.3.2. Conducţia electrică a gazelor

Datorită caracteristicilor fizico-chimice, gazele conţin purtători de sarcină rezultaţi în urma ionizării moleculelor neutre ca urmare a ciocnirilor, radiaţiilor cosmice, radiaţiilor radioactive, etc. Prin ionizarea moleculelor de gaz rezultă perechi electroni-ioni, cu alte cuvinte, două specii de purtători de sarcină: electronii care sunt caracterizaţi printr-o mobilitate ridicată şi ionii, particule mai grele, a căror mobilitate este mai redusă. O parte dintre electronii liberi prezenţi în gaze pot să provină şi de la electrozii metalici în urma unor fenomene de injecţie de sarcină. Un alt proces care poate avea loc în gaze este şi asocierea dintre moleculele de gaz şi electronii liberi, ceea ce conduce la formarea ionilor negativi. De exemplu, moleculele de oxigen

din aer, captează relativ uşor electronii liberi, formând astfel ioni negativi. Alte gaze ale căror molecule „absorb" uşor electroni sunt cele ale elementelor halogenice (Cl, F); acestea au afinitate mare pentru electroni şi se numesc *gaze electronegative* [23].

Concentraţia ionilor în gaze nu poate însă să crească nelimitat deoarece o parte dintre ionii pozitivi se recombină cu ionii negativi, fenomen cunoscut sub numele de *recombinare*. În aerul liber, la o densitate de ioni de aproximativ 500 ioni/cm^3, se constată că fenomenul de ionizare a moleculelor este în echilibru cu cel de recombinare a ionilor. În cazul aplicării unui câmp electric slab, în regim staţionar, se consideră că numărul purtătorilor de sarcină generaţi în urma ionizărilor este egal cu numărul purtătorilor de sarcină care se recombină sau sunt antrenaţi către electrozi.

Totalitatea purtătorilor se sarcină prezenţi într-un gaz, indiferent de natura şi originea lor creează aşa numita *sarcină spaţială* care, aşa cum se va prezenta în continuare, intervine atât în fenomenul de conducţie cât şi în cel de străpungere a gazelor.

Studiile efectuate până în prezent indică faptul că prezentarea principalelor aspecte referitoare la fenomenul de conducţie electrică în gaze necesită tratarea a trei cazuri distincte: cazul câmpurilor electrice slabe, cazul câmpurilor electrice intense şi cazul câmpurilor electrice foarte intense. Dacă se consideră un gaz aflat într-un tub de sticlă în care sunt plasaţi doi electrozi, în funcţie de diferenţa de potenţial aplicată electrozilor poate fi trasată caracteristica de dependenţă dintre curentul ce străbate gazul şi diferenţa de potenţial dintre electrozi (fig. 2.9).

2.3.2.1. Cazul câmpurilor electrice slabe

În câmpuri electrice slabe forţele de natură electrică care se exercită asupra ionilor aflaţi în gaze sunt slabe. În consecinţă, energia cinetică a acestora este redusă şi ciocnirile dintre particule sunt rare astfel încât, sursa principală a purtătorilor de sarcină este asigurată de agenţii de ionizare externi. De exemplu, viteza ionilor în aerul liber, în cazul aplicării unui câmp electric cu intensitatea de 1 V/cm nu depăşeşte 1 – 2 cm/s. Cu alte cuvinte, curentul electric ce străbate un gaz aflat într-un câmp electric slab

este datorat în exclusivitate agenţilor de ionizare externi; încetarea acţiunii acestora conduce la dispariţia curentului electric. În aceste condiţii, se spune că are loc o *descărcare neautonomă* (sau întreţinută). Câmpul electric determină numai deplasarea de la un electrod la celălalt a purtătorilor de sarcină dar nu contribuie la apariţia unor noi purtători de sarcină.

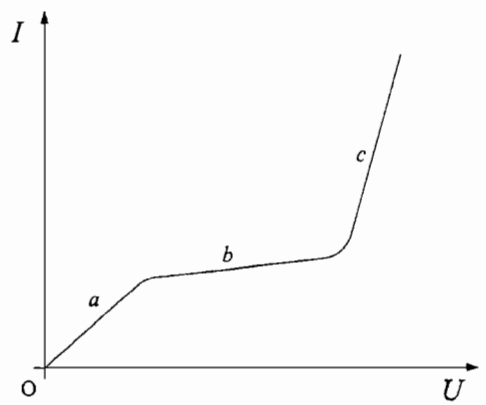


Fig. 2.9. Variaţia intensităţii curentului electric ce străbate un gaz în funcţie de tensiunea aplicată electrozilor.

Experimental se constată că în cazul câmpurilor electrice slabe, intensitatea curentului electric variază liniar cu valoarea tensiunii aplicate electrozilor, adică conducţia electrică în gaze satisface legea lui Ohm (porţiunea a din caracteristica $I(U)$ – fig. 2.9). Acest lucru poate fi explicat pornind de la observaţia că în câmpurile electrice slabe că numărul ionilor antrenaţi de curentul electric este foarte mic iar cele ale ionilor pozitivi $\delta N'_+$, respectiv negativi $\delta N'_-$ care dispar în unitatea de timp şi de volum prin recombinare sunt proporţionale cu concentraţiile numerice N_+, respectiv N_- ale ionilor:

$$\begin{aligned} \delta N'_+ &= C \cdot N_+ \cdot N_- = CN^2 \\ \delta N'_- &= C \cdot N_- \cdot N_+ = CN^2 \end{aligned}, \tag{2.26}$$

în care C este o constantă de proporţionalitate şi $N_+ = N_- = N$ concentraţia de ioni (se are în vedere faptul că, din punct de vedere macroscopic, gazul este neutru).

Așa cum s-a subliniat anterior, în regim staționar, numărul purtătorilor de sarcină din unitatea de volum $\delta N''_+$ și $\delta N''_-$, generați într-o secundă prin ionizarea moleculelor este egal cu numărul purtătorilor de sarcină care se recombină sau sunt antrenați către electrozi, ceea ce înseamnă că $\delta N''_+ = \delta N''_+$, respectiv $\delta N''_- = \delta N''_-$. De asemenea, ținând cont de egalitatea $\delta N''_+ = \delta N''_- = \delta N''$, relația (2.26) și considerând expresia generală a conductivității electrice, rezultă că relația matematică a conductivității electrice a gazului σ_g este:

$$\sigma_g = q_i (M_+ + M_-)(\delta N'' / C)^{1/2}, \qquad (2.27)$$

în care $q_i = q_+ = -q$. reprezintă sarcina electrică a ionilor și M_+ și M_- reprezintă mobilitatea ionilor pozitivi, respectiv, cea a ionilor negativi. Densitatea curentului electric $\vec{J}$ care străbate gazul aflat în câmpul electric de intensitate $\vec{E}$ este:

$$\vec{J} = \sigma_g \cdot \vec{E} = q_i (M_+ + M_-)(\delta N'' / C)^{1/2} \vec{E}. \qquad (2.28)$$

Deoarece mobilitățile și numărul ionilor produși prin ionizări nu depind semnificativ de valoarea intensității câmpului electric, în câmpurile electrice slabe, rezultă că densitatea de curent variază liniar cu $\vec{E}$ ceea ce înseamnă că legea lui Ohm este satisfăcută.

2.3.2.2. Cazul câmpurilor electrice intense

În cazul câmpurilor electrice intense, numărul de electroni antrenați de curentul electric ce străbate gazul între cei doi electrozi este important. În acest caz fenomenul de recombinare este neglijabil și curentul de conducție corespunde convecției celor $\delta N''_+$ și $\delta N''_-$ ioni care dispar la electrozi în unitatea de timp și de volum:

$$\begin{aligned} J &= (\delta N''_+ + \delta N''_-) q_i v \\ &= (\delta N''_+ + \delta N''_-) q_i d = 2\delta N'' q_i d' \end{aligned} \qquad (2.29)$$

în care v reprezintă viteza ionilor numeric egală cu distanța d dintre electrozi (ionii străbat în unitatea de timp distanța dintre electrozi). Relația (2.29)

indică faptul că în cazul câmpurilor electrice intense, densitatea curentului electric ce străbate gazul nu depinde de valoarea tensiunii aplicate electrozilor. Cu alte cuvinte, în acest caz, curentul atinge o valoare de saturaţie care corespunde porţiunii *b* din diagrama prezentate în fig. 2.9.

2.3.2.3. Cazul câmpurilor electrice foarte intense

În cazul unor câmpuri electrice foarte intense, energiile cinetice ale electronilor şi ionilor sunt importante şi, prin ciocniri, pot ioniza moleculele neutre de gaz. În acest fel, câmpul electric contribuie substanţial la crearea de noi purtători de sarcină; numărul ionilor rezultaţi prin ciocniri este substanţial mai mare decât acela al ionilor creaţi de agenţii de ionizare exteriori. În această situaţie, fenomenul de conducţie este întreţinut în gaz chiar de câmpul electric şi este independent de prezenţa sau absenţa surselor de ionizare externe; se spune că se produce o descărcare *neîntreţinută* sau *autonomă*. În gaz se produc avalanşe de purtători de sarcină care conduc la o creştere rapidă a intensităţii curentului electric (porţiunea *c* a caracteristicii din fig. 2.9).

2.3.3. Conducţia electrică a lichidelor electroizolante

În foarte multe cazuri sistemele de izolaţie ale echipamentelor electrice au în componenţa lor lichide electroizolante. De aceea, studiul fenomenelor produse de acţiunea câmpului electric în dielectricii lichizi prezintă o importanţă aparte.

Din cercetările efectuate până în prezent asupra fenomenului de conducţie electrică în lichidele electroizolante rezultă că purtătorii de sarcină sunt ionii proprii şi/sau cei de impurităţi rezultaţi în urma disocierii moleculelor. Expresia generală a conductivităţii electrice a unui lichid impur este [2]:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} C_i \exp\left(-\frac{w_{ai}}{kT}\right), \tag{2.30}$$

în care C_i este o constantă care depinde de concentrația speciei de ioni i și w_{ai} reprezintă energia de activare a ionilor din specia i. De asemenea, se constată că valoarea conductivității electrice a unui lichid impur este întotdeauna mai mare decât valoarea conductivității aceluiași lichid purificat. Rezultă, deci, că impuritățile prezente într-un lichid influențează considerabil fenomenul de conducție electrică. Acest lucru este mai vizibil în cazul lichidelor nepolare sau slab polare ai căror purtători de sarcină sunt ionii rezultați, în principal, prin disocierea impurităților. Fenomenul de disociere a moleculelor de impurități depinde de structura fizico-chimică a lichidului și de valoarea permitivității lichidului.

În cazul unui compus A^+B^- care se dizolvă într-un lichid în urma unei reacții de tipul $A^+B^- \rightarrow A^+ + B^-$ se definește o constantă de disociere, notată cel mai adesea cu K_d [13]:

$$K_d = \frac{|A^+| \cdot |B^-|}{|A^+B^-|}, \tag{2.31}$$

în care $|A^+|$ și $|B^-|$ reprezintă concentrațiile ionilor pozitivi, respectiv negativi rezultați în urma procesului de disociere și $|A^+B^-|$ este concentrația produsului nedisociat. O altă relație de calcul pentru constanta de disociere K_d, care ține cont și de proprietățile solventului (printre care și permitivitatea relativă a lichidului ε_r) și de caracteristicile ionilor rezultați este [13]:

$$K_d = \exp\left[\ln K_0 - C \cdot \frac{q^+ q^-}{\varepsilon_r kT(r_+ + r_-)}\right], \tag{2.32}$$

în care K_0 și C reprezintă două constante de material și q^+, q^-, r^+ și r^- reprezintă sarcinile, respectiv razele ionilor formați. Așa cu rezultă din relația (2.32) disocierea impurităților este influențată atât de permitivitatea relativă ε_r a lichidului cât și de temperatura T. Pentru un lichid cu permitivitate mai mare creșterea temperaturii favorizează procesul de disociere a impurităților.

Ca și în cazul gazelor, și pentru lichide poate fi trasată o caracteristică $I(E)$. În fig. 2.10 este prezentată o astfel de caracteristică

obţinută pentru un lichid electroizolant care a fost supus unui proces de purificare.

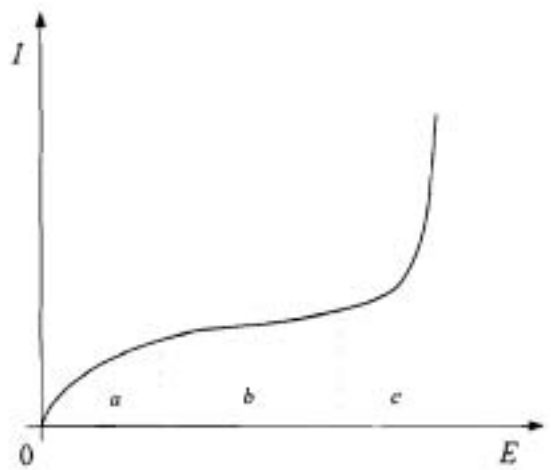


Fig. 2.10. Dependenţa dintre intensitatea curentului de conducţie şi intensitatea câmpului electric în cazul unui lichid purificat.

Prima parte a caracteristici (*a*) corespunde câmpurilor electrice slabe (pentru lichidele uzuale $E < 2 - 3$ kV/mm) şi se constată că intensitatea curentului de conducţie ce străbate lichidul creşte aproape liniar cu câmpul electric aplicat (conducţie ohmică). Pentru aceste valori ale câmpului electric, purtătorii de sarcină sunt ionii pozitivi şi negativi proveniţi de la impurităţile care nu au fost înlăturate în urma procesului de purificare.

Cea de-a doua parte a curbei (*b*) reprezentate în fig. 2.10 corespunde câmpurilor electrice medii, cuprinse, în mod obişnuit între 3 şi 5 kV/mm. Se poate observa că panta caracteristicii scade pe această porţiune (în cazul lichidelor nepolare, pe această porţiune caracteristica poate fi orizontală). Acest lucru se explică, în general, prin faptul că, în cazul câmpurilor electrice medii, concentraţia purtătorilor de sarcină (şi deci conductivitatea lichidelor) este influenţată de cinetica reacţiilor de disociere a moleculelor. În lichidele electroizolante, odată perturbate echilibrele de disociere, acestea se restabilesc după perioade relativ lungi de timp. Sub acţiunea câmpului electric, ionii preexistenţi în lichid (proveniţi în cea mai mare parte din impurităţi) se deplasează către electrozi în timp ce alţi ioni apar prin

disocierea moleculelor de lichid. Astfel, pentru câmpuri de câțiva kV/mm se produce un fel de „epurare electrică" a lichidului.

În cea de-a treia regiune (*c*) se înregistrează o creștere foarte rapidă (cvasiexponențială) a curentului până în momentul producerii străpungerii. Prin urmare, în acest interval, are loc o multiplicare rapidă a purtătorilor de sarcină, fenomen ce poate fi pus atât pe seama ionizării prin ciocnire a moleculelor de lichid (deși anumite studii pun în vedere faptul că ionizarea lichidelor izolante are loc pentru câmpuri de peste 500 kV/cm), cât și injecției de sarcină la electrozi.

Stabilirea expresiei conductivității electrice a lichidelor electroizolante se face pornind de la observația că moleculele și ionii de lichid efectuează oscilații în jurul unor poziții fixe (contrar a ceea ce se întâmplă în cazul gazelor unde moleculele se deplasează haotic). În consecință deplasarea unei molecule sau ion de lichid dintr-o poziție într-alta, corespunde, din punct de vedere energetic, escaladării unei bariere de potențial de înălțime w_b dependentă de natura lichidului. Ținând cont de direcțiile și sensurile de deplasare posibile pentru o moleculă și notând cu f frecvența de oscilație a acesteia, rezultă că probabilitatea de escaladare a barierei w_b este [2]:

$$P_e = \frac{f}{6}\exp\left(-\frac{w_b}{kT}\right). \tag{2.33}$$

Se constată că durata de relaxare τ caracteristică mișcării de oscilație a moleculelor de lichid depinde de temperatura T și natura lichidului conform relației [2]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{w_b}{kT}\right), \tag{2.34}$$

în care $\tau_0 = f/6$. Relația (2.34) arată că durata de relaxare crește cu temperatura, observație care este în acord și cu rezultatele experimentale obținute până în prezent. Pornind de la expresia generală a constantei de difuziune a particulelor [2]:

$$D = \frac{f}{6} a^2 \exp\left(-\frac{w_b}{kT}\right) \tag{2.35}$$

în care a reprezintă distanța medie dintre două molecule de lichid și ținând cont de (2.34), rezultă că $D = a^2/\tau$. Considerâdn relația lui *Einstein* care leagă constanta de difuzie D de mobilitatea M și sarcina q_i unui ion [2]:

$$D = \frac{kT}{q_i} M, \tag{2.36}$$

rezultă expresia mobilității unui ion în lichid M:

$$M = \frac{a^2 q_i}{\pi kT}, \tag{2.37}$$

care poate fi introdusă în relația generală a conductivității electrice $\sigma = Nq_iM$ rezultând:

$$\sigma_L = \frac{Na^2 q_i^2}{\pi kT} = C_L \exp\left(-\frac{w_b}{kT}\right), \tag{2.38}$$

cu $C_L = \frac{Na^2 f q_i^2}{6kT}$.

Expresia (2.38), similară cu expresia (2.30), indică faptul că valoarea conductivității electrice a unui lichid electroizolant crește sensibil cu temperatura. Ținând cont de forma factorului C_L, se observă că σ_L crește odată cu creșterea concentrației de ioni N.

2.3.3.1. Efectul câmpului electric asupra proceselor de disociere

Încă din anul 1934 cercetătorul de origine norvegiană *Lars Onsager* a arătat că rata de producere a purtătorilor de sarcină prin disocierea moleculelor depinde de intensitatea câmpului electric aplicat. Cu alte cuvinte, valoarea constantei de disociere $K_d(E)$ se modifică în funcție de valoarea lui E [2]:

$$K_d(E) = K_d F(b) = \\ = K_d\left[1 + b + \frac{(2b)^2}{2!3!} + \frac{(2b)^3}{3!4!} + \ldots\right], \quad (2.39)$$

în care K_d și $K_d(E)$ reprezintă valorile constantei de disociere în absența, respectiv prezența câmpului electric, iar $F(b)$ este o funcție cu următoarea expresie:

$$F(b) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} (8b)^{-0,75} \exp(8b)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.40)$$

în care $b = 9,636E/\varepsilon_r T^2$, ε_r fiind permitivitatea relativă a lichidului, T temperatura și E intensitatea câmpului electric în V/cm.

Dacă se consideră că cele două specii de ioni (cu sarcini de semne opuse) contribuie în mod egal la procesul de conducție, conductivitatea electrică a lichidului poate fi calculată cu ajutorul expresiei:

$$\sigma(E) = \sigma_0 [F(b)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.41)$$

în care σ_0 reprezintă conductivitatea electrică a lichidului în câmpuri electrice slabe (care nu influențează procesele de disociere). Rezultatele obținute arată că efectul câmpului electric asupra fenomenelor de disociere este cu atât mai pronunțat cu cât valoarea permitivității relative a lichidului este mai redusă.

2.3.3.2. Fenomene specifice interfeței metal - lichid

În anumite condiții, la interfața electrod – lichid electroizolant se poate produce o injecție de sarcină. Într-adevăr, intensitatea locală a câmpului electric în imediata vecinătate a asperităților metalice existente pe suprafețele electrozilor poate fi cu mult mai mare (unu – două ordine de mărime) decât valoarea medie a câmpului electric dintre electrozi. În aceste regiuni poate avea loc o injecție la rece de electroni. Densitatea curentului electric corespunzător acestui fenomen este de aceeași formă cu cea dată de (2.25), electronii care părăsesc catodul traversând bariera de potențial prin efect tunel (injecția *Fowler – Nordheim*).

Ţinând cont de faptul că valoarea lucrului mecanic de extracţie a unui electron dintr-un metal este de ordinul a câtorva elecron-volţi, un calcul simplu arată că intensitatea curentului corespunzător acestui fenomen de injecţie se poate modifica sensibil pentru intensităţi ale câmpului electric de ordinul 1 V pe câteva distanţe interatomice (E = 1 V/ 10 Å = 10^9 V/m). Valoarea intensităţii câmpului electric astfel rezultată este mai mare cu cel puţin un ordin de mărime faţă de valorile rigidităţilor dielectrice a lichidelor uzuale. Fenomenul de injecţie la rece de electroni la catod este influenţat însă şi de sarcina spaţială existentă în lichid. În acest sens se constată că sarcina spaţială formată de ionii pozitivi conduce la diminuarea semnificativă a lucrului mecanic de extracţie a electronilor din metal, ceea ce facilitează fenomenul de injecţie.

Injecţia de sarcină la interfaţa lichid-electrod metalic este influenţată şi de formarea unui strat de ioni fixaţi pe suprafaţa electrozilor. Aceşti ioni proveniţi din lichid sunt supuşi acţiunii forţelor imagine, ceea ce conduce la apariţia unui strat dublu de ioni (ionii propriu-zişi şi imaginile lor electrice). Cele două straturi formează un condensator electric cu o capacitate de ordinul 10 $\mu F/cm^2$ şi o tensiune între armături de aproximativ 1 V. Prin urmare, între electrod şi lichid apare o tensiune electrică numită, în general, *tensiune de polarizare*. Aceasta are un rol foarte important în transferul de electroni între electrozi şi lichid.

Tensiunea de polarizare creşte odată cu creşterea intensităţii câmpului electric dintre electrozi şi la atingerea unei valori corespunzătoare oxidoreducerii unei specii neutre (lichidul însuşi, apa, impurităţile existente în lichid), se produce o injecţie de sarcină datorată unei reacţii electrochimice (moleculele de lichid reacţionează cu electronii proveniţi din electrod).

În cazul lichidelor nepolare şi foarte pure, producerea reacţiilor electrochimice nu este favorizată. Prin urmare, stratul dublu de ioni nu se formează şi nu apare o tensiune de polarizare care să conducă la injecţia de electroni din metal.

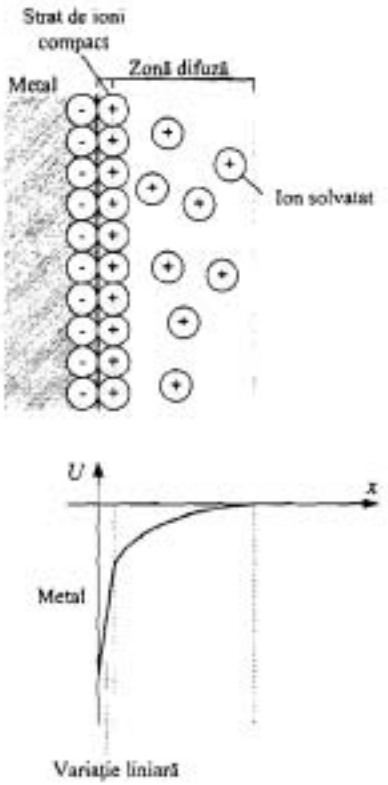


Fig. 2.11. Reprezentarea schematică a stratului dublu de ioni format la interfața electrod – lichid și variația tensiunii electrice corespunzătoare.

2.3.3.3. Curentul datorat particulelor aflate în suspensie

Lichidele utilizate în sistemele de izolație ale echipamentelor electrice conțin particule submicronice provenite de la impurități sau de la celelalte componente ale sistemului de izolație. Aceste particule pot contribui la fenomenul de conducție electrică.

În general, proprietățile dielectrice ale particulelor solide diferă în raport cu cele ale lichidului izolant. Prin urmare, suprafața unei particule constituie interfața între două medii dielectrice diferite. În cazul aplicării unui câmp electric, repartiția spațială a acestuia va fi modificată local datorită prezenței unei particule, liniile de câmp răsfrângându-se la suprafața

particulei. Sub acţiunea forţelor coulombiene, ionii existenţi în lichid vor fi dirijaţi spre particulă unde se vor fixa. Acest proces de încărcare cu sarcină electrică se va produce atât timp cât sarcina acumulată de particulă rămâne inferioară unei valori limită ce depinde de intensitatea locală a câmpului electric E.

În cazul unor particule sferice de rază r, sarcina electrică de încărcare poate fi exprimată cu ajutorul relaţiei [24]:

$$Q_p = \frac{2}{3}\pi^3 \varepsilon r^2 E, \tag{2.42}$$

în care ε reprezintă permitivitatea lichidului. În realitate însă, particulele au forme neregulate şi datorită muchiilor ascuţite şi protuberanţelor se constată că sarcina electrică de încărcare calculată cu relaţia (2.42) este totdeauna inferioară celei reale.

Particulele încărcate cu sarcină electrică, aflate în suspensie în lichid, se deplasează sub acţiunea câmpului electric şi ajung la electrozi unde sunt neutralizate. Mişcarea „oscilatorie" a particulelor între cei doi electrozi continuă până la anularea câmpului electric.

Studii experimentale arată că prezenţa particulelor metalice sau izolante în lichidele electroizolante modifică sensibil valoarea conductivităţii electrice. În fig. 2.12 sunt prezentate curbe de variaţie a conductivităţii electrice a uleiului mineral în funcţie de pătratul tensiunii aplicate electrozilor pentru diferite concentraţii de particule de aluminiu.

2.3.4. Conducţia electrică a izolatorilor solizi

Fenomenul de conducţie electrică în izolatorii solizi este foarte complex. În funcţie de natura dielectricului, purtătorii de sarcină pot fi electronii liberi şi ionii pozitivi sau negativi. Astfel, izolatorii solizi prezintă două tipuri de conducţie electrică: *conducţie electronică* şi *conducţie ionică* (fig. 2.13). În cele ce urmează vor fi prezentate principalele mecanisme de conducţie care apar în funcţie de intensitatea câmpului electric aplicat.

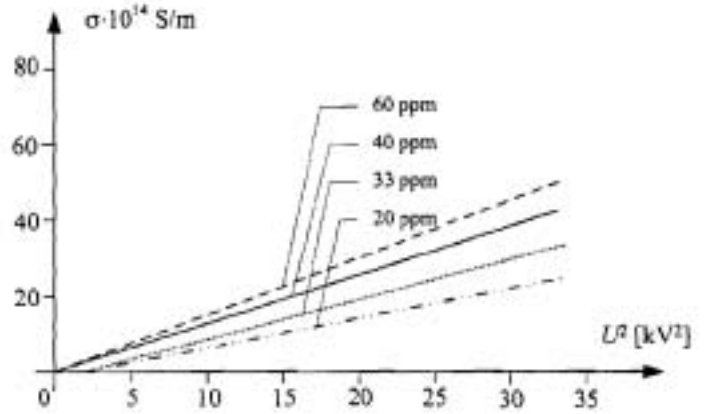


Fig. 2.12. Variația conductivității electrice a uleiului mineral în funcție de pătratul tensiunii aplicate între electrozi pentru diferite concentrații de particule de aluminiu la $T = 19$ °C [3].

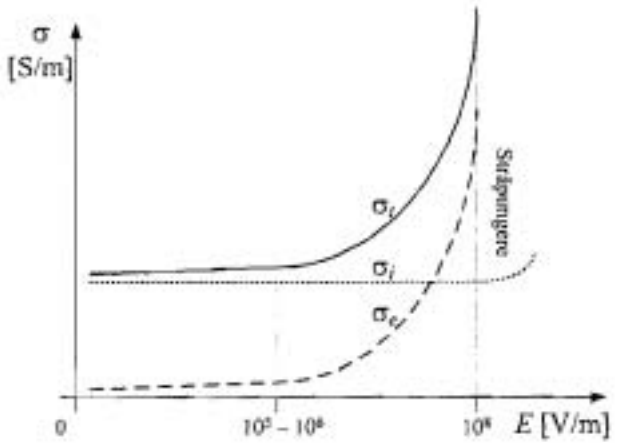


Fig. 2.13. Variația conductivității electrice a unui izolator solid cu intensitatea câmpului electric aplicat.

2.3.4.1. Cazul câmpurilor electrice slabe

Experimental se constată că în cazul câmpurilor electrice slabe ($E < 10^5$ V/m) valoarea conductivității electrice a materialelor electroizolante solide nu depinde de E. Conductivitatea corespunzătoare

electronilor liberi σ_e este foarte redusă (fig. 2.13), predominând conducţia asigurată de ionii pozitivi sau negativi. Ionii care participă la conducţie sunt fie ionii proprii ai corpului (în cazul izolatorilor ionici), fie cei proveniţi de la impurităţile prezente în izolant. Există însă anumite studii care arată că identificarea tipurilor de purtători de sarcină este foarte dificilă. Mai mult, în urma experimentelor realizate pe anumiţi polimeri s-a constatat că, pentru câmpuri electrice slabe, o parte dintre aceştia prezintă preponderent o conducţie ionică, în timp ce o altă parte prezintă, în principal, o conducţie electronică. Cu alte cuvinte, chiar dacă, în general se admite că în câmpuri slabe conducţia izolatorilor este asigurată mai ales de ioni, natura purtătorilor de sarcină depinde, totuşi, de structura fizico-chimică a izolatorului.

Uzual se consideră că în cazul câmpurilor electrice slabe, ca şi în cazul gazelor sau lichidelor izolante conducţia electrică a izolatorilor solizi prezintă un caracter ohmic ($I(U)$ prezintă o variaţie liniară). Totuşi, modelul conducţiei ohmice presupune existenţa unor valori mari ale mobilităţii purtătorilor de sarcină, condiţie care nu este îndeplinită în cazul izolatorilor solizi. Modelul conducţiei ohmice este modificat, în acest caz, prin luarea în considerare a defectelor existente în izolatori care fixează purtătorii de sarcină. Datorită prezenţei defectelor (capcanelor) concentraţia purtătorilor de sarcină care pot participa la conducţie scade, ceea ce echivalează practic cu scăderea mobilităţii acestora.

Modelele conducţiei ionice dezvoltate în literatura de specialitate au la bază, în general, deplasarea ionilor în izolatoarele cristaline (în interstiţii sau între *vacanţele* existente în corp). Calculul conductivităţii ionice se poate face cu o relaţie simplă de forma relaţiei (2.30), unde w_{ai} reprezintă energia de activare a ionilor din specia i. Se consideră că atât mobilitatea cât şi concentraţia ionilor depinde sensibil de temperatură. În consecinţă, conductivitatea ionică variază în funcţie de temperatură conform relaţiei [2]:

$$\sigma_i = \sigma_{i0} \exp\left(-\frac{w_a}{kT}\right), \tag{2.43}$$

în care σ_{i0} şi w_a sunt constante în anumite intervale de temperatură şi pot fi determinate experimental pentru fiecare material. De asemenea, se

consideră că ionii existenți în izolatori sunt fixați în gropi de potențial de adâncimi diferite și că mobilitatea acestora depinde de ușurința cu care părăsesc aceste capcane. Evident, *activarea* ionilor localizați în capcane depinde de temperatura corpului și de intensitatea câmpului electric.

Conducția izolatorilor solizi asigurată de electroni în câmpuri electrice slabe poate fi analizată pe două căi. Cea mai simplă dintre acestea consideră că în izolatori (ca și în cazul semiconductorilor sau metalelor) există o conducție în benzi de energie și deci poate fi utilizată relația:

$$\sigma_e = \sigma_{en} + \sigma_{ep} + \sigma_{ei} = C_{en} \exp\left(-\frac{w_{en}}{2kT}\right) + C_{ep} \exp\left(-\frac{w_{ep}}{2kT}\right) + C_{ei} \exp\left(-\frac{w_i}{2kT}\right), \tag{2.44}$$

în care C_{en}, C_{ep} și C_i sunt mărimi care depind de concentrațiile de impurități și de particule ale izolatorului solid, w_{en} și w_{ep} reprezintă energiile de ionizare ale impurităților și w_i este lărgimea benzii interzise a izolatorului. Deși această teorie este acceptată în cazul anumitor izolatori, se constată totuși că fenomenele legate de conducția electronică în izolatorii solizi sunt mult mai complexe. Mobilitățile electronilor sunt atât de reduse, încât vitezele de drift ale acestora sunt cu până la șase ordine de mărime mai mici decât viteza caracteristică corespunzătoare mișcării de agitație termică. În consecință, vitezele electronilor care pot participa la conducție nu sunt practic influențate de E și deci tranzițiile din banda de valență în banda de conducție sunt dificil de explicat.

Cel de-al doilea model al conducției electronice în câmpuri electrice slabe ține cont de prezența unui număr foarte mare de defecte în izolatorii solizi. Datorită defectelor în cazul izolatorilor, banda interzisă Fermi conține foarte multe stări localizate (fig. 2.14). De fapt, în cazul izolatorilor, în locul benzii interzise se utilizează noțiunea de *bandă de mobilitate* [2]. Așa cum se poate observa în prezentarea schematică din fig. 2.14, marginile benzilor de valență (*bv*) și de conducție (*bc*) nu sunt net definite. De asemenea, densitatea stărilor localizate de energie este redusă în mijlocul benzii și crește semnificativ către extremități. Fig. 2.14 prezintă și variația mobilității

electronilor $\mathcal{M}$ în funcţie de energia w. Se observă că deşi marginile benzii interzise nu sunt bine definite, există totuşi valori ale energiei pentru care mobilitatea electronilor suferă o variaţie importantă. Astfel, banda de mobilitate este mărginită de zone foarte înguste în care mobilitatea electronilor variază brusc, numite *muchii de mobilitate*. Valoarea minimă a mobilităţii electronilor care permite participarea lor la fenomenul de conducţie electrică este calculată, în teoria benzilor de energie, cu următoarea relaţie [2]:

$$\mathcal{M}_{min} = \frac{q_0 a^2}{8\hbar}, \tag{2.45}$$

în care q_0 este modulul sarcinii electrice a unui electron, a distanţa medie dintre particulele izolatorului (constanta de reţea, în cazul izolatorilor cristalini) şi $\hbar = h/2\pi$, cu $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s constanta lui *Planck*.

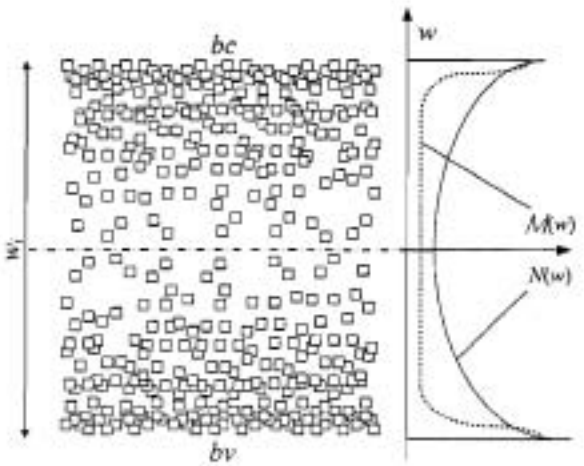


Fig. 2.14. Reprezentarea schematică a stărilor de energie localizate într-un izolator amorf, a variaţiei densităţii de stări $N(w)$ şi a mobilităţii electronilor $\mathcal{M}(w)$ [2].

Acest model introduce conceptul de *mobilitate limitată de capcane*. Existenţa stărilor localizate conduce la fixarea unui anumit număr de electroni, cu alte cuvinte anumiţi electroni sunt împiedicaţi să participe la fenomenul de conducţie. Utilizând câteva noţiuni de bază din teoria benzilor

de energie a electronilor, se poate exprima raportul dintre concentrația electronilor liberi n_c și concentrația electronilor fixați în capcane n_t:

$$\xi = \frac{n_c}{n_t} = \frac{N_{bc}}{N_t} \exp\left(-\frac{\Delta w_t}{kT}\right). \tag{2.46}$$

Această relație s-a dedus considerând că toate stările localizate din banda de mobilitate se găsesc pe un nivel energetic w_t situat la Δw_t de primul nivel al benzii de conducție (N_{bc} densitatea de stări energetice din banda de conducție și N_t densitate de stări introduse de capcane). Prin urmare, concentrația de electroni care pot participa la conducție se reduce de la n_c la ξn_c. Acest fenomen este cunoscut însă ca o *reducere a mobilității electronilor de către capcane* și nu ca o reducere a concentrației electronilor de conducție. Cu alte cuvinte, rezultă că, în prezența capcanelor electronii au nevoie de un timp mai îndelungat pentru a parcurge o anumită distanță decât în lipsa acestora. În consecință, conductivitatea electronică $\sigma_e = nq_0\mu$ se multiplică cu un factor ξ care, în funcție de concentrația de capcane, poate avea un ordin de mărime de 10^{-10}.

2.3.4.2. Cazul câmpurilor electrice intense

În cazul câmpurilor electrice intense ($E = 10^6 - 10^8$ V/m) se înregistrează o creștere rapidă a conductivității electrice. Acest lucru se datorează creșterii exponențiale a conductivității electronice (fig. 2.13), fenomen explicat prin creșterea concentrației de electroni participanți la fenomenul de conducție. În câmpuri electrice intense acest lucru se explică prin producerea fenomenelor de injecție de sarcină la electrozi (efectul *Schottky* și efectul *Fowler-Nordheim* - §2.3.1) cât și prin alte fenomene care se produc în volumul izolatorului și care vizează practic mecanismele de „eliberare" a electronilor din capcane.

Sarcina injectată la electrozi se deplasează cu dificultate în volumul izolatorului, astfel încât, în vecinătatea electrozilor se formează o *sarcină spațială* care reduce intensitatea locală a câmpului electric, diminuează sarcina injectată și îngreunează și mai mult deplasarea purtătorilor de sarcină. Modelul de conducție în volumul izolatorilor care ține cont de

formarea acestei sarcini spaţiale este cunoscut sub numele de *conducţie limitată (sau controlată) de sarcina spaţială.*

Un al doilea mecanism de conducţie în volumul izolatorilor solizi vizează deplasarea electronilor între stările de energie localizate existente în banda de mobilitate. Acest mecanism este cunoscut sub denumirea de *conducţie prin salt.*

Cel de-al treilea mecanism de conducţie, numit *Poole-Frenkel*, ţine cont, de asemenea, de existenţa, în izolatori, a stărilor de energie localizate. Astfel, în câmpuri electrice intense înălţimile barierelor de energie corespunzătoare activării electronilor localizaţi în capcane scad, ceea ce conduce la o creştere a concentraţiei purtătorilor de sarcină.

a) Conducţia limitată de sarcina spaţială

Caracterizarea conducţiei electrice limitate de sarcina spaţială, presupune într-o primă etapă, analiza fenomenelor care conduc la formarea sarcinii spaţiale în izolatorii solizi. Pentru aceasta se consideră un film electroizolant plasat între doi electrozi metalici între care se aplică o diferenţă de potenţial (fig. 2.15). Dacă intensitatea câmpului electric este suficient de mare, la interfaţa metal-izolant se produce o injecţie de sarcină. O parte dintre electronii care părăsesc metalul şi intră în izolator se for fixa pe defectele izolatorului, rezultând o densitate importantă de sarcină electrică care modifică local repartiţia spaţială a câmpului electric. Sub acţiunea câmpului electric, o altă parte dintre electronii injectaţi părăsesc izolatorul. Cel puţin la început, sarcina electrică injectată în dielecric este mai mare decât cea care se scurge la electrodul opus. Prin urmare, sarcina electrică spaţială formată în interiorul materialului influenţează, prin intermediul câmpului electric produs, atât injecţia de noi purtători de sarcină cât şi deplasarea celor deja injectaţi, de unde şi denumirea acestui mecanism.

Obţinerea expresiei densităţii curentului electric corespunzător acestui mecanism presupune rezolvarea ecuaţiilor câmpului electric, cuplate cu acelea care caracterizează cinetica procesului de fixare – activare a electronilor în şi din capcane. Considerând densitatea sarcinii spaţiale $\rho(x,t)$

ca funcție numai de abscisa x și de timp și luând în considerare fenomenul de difuziune a sarcinilor electrice în interiorul izolantului, ecuațiile câmpului electric pot fi scrise:

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = \frac{\rho(x,t)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{q_0 n'(x,t)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \tag{2.47}$$

$$j(x,t) = q_0 n(x,t) \mu E(x,t) - q_0 D_n \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \tag{2.48}$$

$$E(x,t) = -\frac{\partial V(x,t)}{\partial x}, \tag{2.49}$$

în care $n'(x,t)$ și $n(x,t)$ reprezintă concentrația totală a electronilor din izolant (atât cei care participă la conducție cât și cei care sunt fixați pe capcane), respectiv concentrația electronilor care participă la conducție la momentul de timp t, D_n este coeficientul de difuzie a electronilor și $V(x,t)$ potențialul electric în punctul x la momentul de timp t. Pentru descrierea completă a problemei, pe lângă ecuațiile (2.47) – (2.49) trebuie să se considere o altă ecuație care să descrie dinamica proceselor de fixare – activare pe și din capcane a electronilor. Ținând cont de fenomenele asociate eliberării unui electron dintr-o groapă de potențial, pentru aceasta sunt folosite relații de forma celor stabilite la efectul *Fowler-Nordheim* – (2.24).

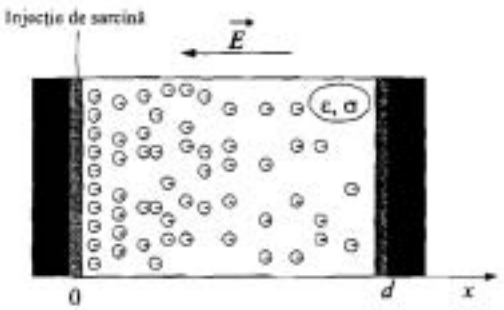


Fig. 2.15. Explicativă pentru conducția limitată de sarcina spațială într-un dielectric solid.

Rezolvarea sistemului de ecuaţii descrise mai sus permite obţinerea unei soluţii caracteristice mecanismului de conducţie limitată de sarcina spaţială. Datorită complexităţii ecuaţiilor, sistemul (2.47) – (2.49) şi (2.24) nu poate fi rezolvat pe cale analitică. Din acest motiv, în general sunt considerate mai multe ipoteze simplificatoare printre care cele mai importante sunt:

- regim permanent ($\partial/\partial t = 0$);
- mobilitatea electronilor este constantă (nu depinde de E şi de x);
- contactul dintre metal şi izolator este foarte bun (rezistenţă de contact foarte scăzută);

Cu aceste ipoteze simplificatoare, pot fi considerate mai multe cazuri: izolatori ideali fără capcane, izolatori cu capcane situate pe acelaşi nivel de energie, izolatori cu capcane situate pe mai multe niveluri de energie discrete şi izolatori cu capcane corespunzătoare unui spectru continuu de energie. În continuare vor fi prezentate pe scurt unele dintre aceste cazuri.

a.1) Izolatoare fără capcane

Considerând un film izolant fără capcane de grosime d aflat între doi electrozi metalici paralei şi presupunând că are loc o injecţie de electroni la interfaţa catod-izolant (caracterizată de o rezistenţă electrică foarte scăzută), densitatea curentului electric stabilit între electrozi are trei componente:

$$\begin{aligned} J &= J_E + J_d + J_D \\ &= nq_0\mathcal{M}E - q_0 D_n \frac{dn}{dx} + \frac{dD}{dt}, \end{aligned} \tag{2.50}$$

în care $J_E = nq_0\mathcal{M}E$, $J_d = -q_0 D_n \frac{dn}{dx}$ şi $J_D = \frac{dD}{dt}$ sunt, în ordine, curentul de drift, curentul de difuzie şi curentul de deplasare. Considerând regimul permanent şi neglijând curentul de difuzie (ceea ce corespunde practic unei densităţi uniforme de sarcină spaţială) şi utilizând ecuaţia (2.47) rezultă expresia densităţii curentului electric:

$$J = \varepsilon_0 \varepsilon_r M E \frac{dE}{dx}, \tag{2.51}$$

din care, prin integrare, rezultă:

$$E = \left[\frac{2J}{\varepsilon M} (x + x_0) \right]^{1/2}, \tag{2.52}$$

în care x_0 este o constantă de integrare care poate fi determinată utilizând condițiile la limită pentru n. Cu ipotezele enunțate mai sus, din relațiile (2.50) și (2.52) și considerând că $x_0 << d$ (ceea ce corespunde unui contact electric catod-izolant foarte bun), rezultă expresia tensiunii electrice dintre cei doi electrozi:

$$\begin{aligned} U = \int_0^d E dx &= \int_0^d \left[\frac{2J}{\varepsilon_0 \varepsilon_r M M} (x + x_0) \right]^{1/2} dx \\ &= \frac{2}{3} \left(\frac{2J}{\varepsilon_0 \varepsilon_r M} \right)^{1/2} d^{3/2}, \end{aligned} \tag{2.53}$$

din care se obține expresia lui J:

$$J = \frac{9}{8} \varepsilon_0 \varepsilon_r M \frac{U^2}{d^3}. \tag{2.54}$$

Relația (2.54) arată că densitatea curentului electric ce străbate dielectricul variază proporțional cu pătratul tensiunii aplicate electrozilor și invers proporțional cu cubul grosimii d, cunoscută sub numele de *legea Mott-Gourney* sau *legea lui Child* pentru solide și corespunde zonei 2 din diagrama trasată în figura 2.16.

Dacă valoarea intensității câmpului electric aplicat nu este suficient de mare, fenomenul de injecție de sarcină la interfața catod-izolant nu are loc. În aceste condiții, așa cum s-a prezentat în subcapitolul anterior, în izolator are loc o conducție ohmică asigurată de electronii existenți în izolant, având concentrația n_0 căreia îi corespunde densitatea de curent $J_0 = n_0 q_0 M U / d$ - zona 1 din fig. 2.16.

Pentru câmpuri electrice foarte intense bariera de potențial catod-izolant se reduce foarte mult (vezi efectul *Schottky* și injecția *Fowler-*

Nordheim) şi concentraţia electronilor injectaţi n_1 devine importantă. Notând cu J_s densitatea curentului limitat de sarcina spaţială exprimată de relaţia (2.54), rezultă densitatea curentului total:

$$J = J_0 + J_s = n_0 q_0 M \frac{U}{d} + \frac{9}{8}\varepsilon_0 \varepsilon_r M \frac{U^2}{d^3}. \tag{2.55}$$

Ponderea celor doi termeni ai curentului depinde de intensitatea câmpului electric, adică de tensiunea electrică aplicată electrozilor. Se defineşte o tensiune de tranziţie U_{tr}, care reprezintă cea mai mică valoare a tensiunii pentru care conducţia electrică limitată de sarcina spaţială este preponderentă. Prin egalarea expresiilor densităţilor de curent J_0 şi J_s se obţine:

$$U_{tr} = \frac{8}{9}\frac{q_0 n_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} d^2. \tag{2.56}$$

Valoarea tensiunii de tranziţie U_{tr} se poate obţine şi experimental prin trasarea caracteristicii $\log J$ ($\log U$) – fig. 2.16.

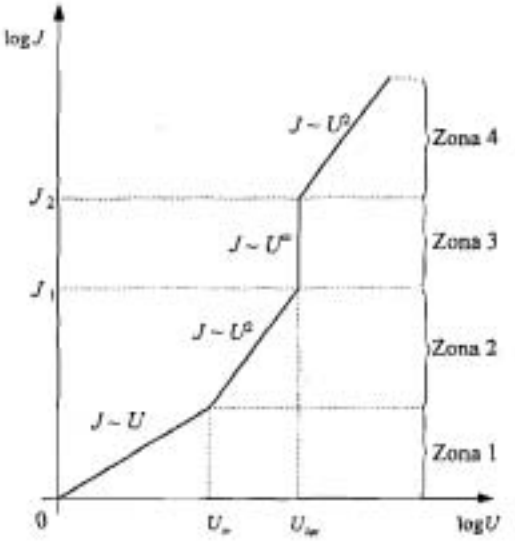


Fig. 2.16. Variaţia densităţii curentului limitat de sarcina spaţială în funcţie de tensiunea aplicată electrozilor.

Ținând cont de expresia tensiunii de tranziție U_{tr} și de valoarea acesteia, care poate fi determinată din caracteristica experimentală $\log J$ ($\log U$) – fig. 2.16, se poate aproxima densitatea sarcinii spațiale prezente în dielectric. Desigur, trebuie avut în vedere că sarcina spațială este constituită atât din electronii care participă la conducție cât și din cei fixați pe defectele izolatorului.

a.2) Izolatoare cu capcane

Influența capcanelor asupra fenomenului de conducție a fost discutată în paragraful §2.3.4.1. Prin urmare, ținând cont de cele prezentate mai sus, se poate afirma că prezența unei capcane în volumul izolatorului va împiedica un electron injectat să participe la conducție. Rezultă deci că numai fracția ξ (definită de (2.46)) din electronii injectați contribuie la stabilirea curentului electric, a cărei densitate este dată de expresia (2.54):

$$J = \xi \frac{9}{8} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu \frac{U^2}{d^3} \tag{2.57}$$

și prin urmare și tensiunea de tranziție U_{tr} dată de relația (2.56) este de ξ mai mică.

Dacă în fiecare capcană prezentă în izolant este fixat un electron (cu alte cuvinte toate capcanele sunt ocupate), influența acestora asupra electronilor injectați este nulă. Prin urmare, în această situație, densitatea sarcinii spațiale fixate în materialul electroizolant este $q_0 N_t$, unde N_t a fost definit anterior ca fiind densitatea de volum a stărilor localizate (a capcanelor). Înlocuind ρ în relația (2.47) și integrând, rezultă expresia tensiunii pentru care toate capcanele izolatorului sunt ocupate, numită *tensiune limită de umplere a capcanelor* U_{luc}:

$$U_{luc} = \frac{q_0 N_t d^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r}. \tag{2.58}$$

Cand tensiunea aplicată electrozilor atinge valoarea U_{luc}, $\xi \to 1$, ceea ce corespunde de fapt la o creștere bruscă a curentului electric de la valoarea J_1 la valoare J_2 - zona 3, din fig. 2.16. Evident, după ce toate capcanele au

fost ocupate, densitatea curentului electric corespunde expresiei (2.54) – zona 4 din fig. 2.16.

b) Conducţia prin salt („hopping")

Acest mecanism de conducţie în volumul izolatorilor solizi constă în transferuri activate termic ale electronilor între două stări de energie vecine, localizate în banda de mobilitate definită în §2.3.4.1. În general, lărgimea benzii de mobilitate a izolatorilor este mare şi din acest motiv, diferenţele dintre energiile caracteristice ale capcanelor pot fi importante. Pe de altă parte, energiile electronilor fixaţi pe defectele izolatorului sunt de ordinul kT. Prin urmare, în condiţii obişnuite, tranziţiile electronilor nu se pot realiza decât între stări vecine de energie foarte apropiată. Analiza conducţiei prin „*hopping*" constă, de fapt, în examinarea mecanismului prin care un electron trece dintr-o stare într-alta.

Din punct de vedere energetic, trecerea unui electron dintr-o stare de energie localizată într-altă stare, înseamnă depăşirea unei bariere de potenţial care se poate face fie printr-un *salt termic* (escaladarea barierei) fie prin *efect tunel*, sau printr-o *combinaţie* a celor două mecanisme. Saltul termic peste bariera de potenţial corespunzătoare tranziţiei este puţin probabil datorită faptului că înălţimea corespunzătoare barierei este destul de mare. De asemenea, în condiţii uzuale şi probabilitatea ca un electron să se deplaseze dintr-un punct într-altul prin efect tunel pur este foarte mică. În consecinţă, transferul unui electron între două stări energetice situate în banda de mobilitate se face printr-o combinaţie a celor două mecanisme descrise mai sus: electronul este promovat termic pe un nivel de energie egală sau foarte apropiată de cea a punctului unde urmează să se deplaseze şi apoi, prin efect tunel ajunge în punctul de destinaţie [2].

Probabilitatea ca un electron să efectueze o tranziţie între două stări energetice localizate depinde, în consecinţă, de probabilităţile de producere ale celor două fenomene: probabilitatea de activarea termică şi probabilitatea de tunelarea între două puncte de energii egale sau foarte apropiate. Astfel, expresia probabilităţii P_{ter} ca un electron să se găsească într-o stare excitată de aceeaşi energie cu o stare vecină aflată la distanţa R

este [2]:

$$P_{ter} = C_{ter} \exp\left(-\frac{\Delta w(R)}{kT}\right), \tag{2.59}$$

în care $\Delta w(R)$ reprezintă energia de promovare termică (diferenţa dintre nivelurile energetice ale celor două stări implicate în proces) şi C_{ter} este o constantă. Probabilitatea ca electronul să se găsească în zona vecină de aceeaşi energie, adică probabilitatea de tunelare este [2]:

$$P_{tun} = C_{tun} \exp(-2\alpha R), \tag{2.60}$$

în care C_{tun} este o constantă şi α o funcţie care variază foarte puţin cu temperatura.

Energia de promovare termică $\Delta w(R)$ poate fi determinată în funcţie de distanţa R cu ajutorul expresiei densităţii stărilor de energie $g(w_F)$ – numărul de stări de energie din unitatea de volum şi din unitatea de energie - situate în imediata vecinătate a nivelului *Fermi* w_F. Astfel, numărul de stări energetice dintr-o sferă de rază R din intervalul de energie cuprins între w_F şi $w_F + dw$ este $g(w_F)\ (4\pi R^3/3)dw$. Rezultă, deci, că distanţa pe care un electron trebuie s-o tuneleze pentru a găsi o zonă neocupată de aceeaşi energie cu acea a stării excitate termic în care se găseşte $(w_F + \Delta w(R))$ se poate obţine egalând numărul de stări energetice din $\Delta w(R)$ cu 1 [2]:

$$g(w_F)\frac{4\pi R^3}{3}\Delta w(R) = 1\ . \tag{2.61}$$

Relaţia (2.61) stabileşte legătura dintre energia de activare termică şi distanţa pe care electronul trebuie s-o parcurgă pentru a efectua tranziţia între cele două stări. Mai mult, rezultă că energia necesară unui electron pentru a efectua tranziţia între două stări $\Delta w(R)$ scade atunci când R creşte. Conform relaţiilor (2.59) şi (2.60) rezultă că o creştere a distanţei R conduce la o creştere a probabilităţii P_{ter} şi la o scădere a probabilităţii de tunelare P_{tun}. Prin urmare, la o temperatură dată, există o distanţă optimă R_0 între punctul în care se află electronul şi punctul în care acesta urmează a se deplasa, pentru care probabilitatea totală $P_t = P_{tun} \cdot P_{ter}$ este maximă. Dacă se

notează $C_t = C_{ter} \cdot C_{tun}$, rezultă expresia probabilităţii totale:

$$P_t = C_t \exp\left[-u(R)\right], \tag{2.62}$$

în care argumentul exponenţialei $u(R)$ este:

$$u(R) = 2\alpha R + \frac{3}{4\pi g(w_F)kT} \cdot \frac{1}{R^3}. \tag{2.63}$$

Minimul funcţiei $u(R)$ pentru care P_t este maximă se obţine anulând prima derivată în raport cu R:

$$R_0 = \left[\frac{8\pi g(w_F)\alpha kT}{9}\right]^{-1/4}. \tag{2.64}$$

Introducând $u(R_0)$ în expresia (2.62) se obţine expresia generală a probabilităţii ca un electron să efectueze o tranziţie între două stări vecine,

$$P_{t,0} = C_t \exp\left\{-4\left[\frac{2\alpha^3}{9\pi g(w_F)kT}\right]^{1/4}\right\}, \tag{2.65}$$

care reprezintă, de fapt, expresia probabilităţii de producere a conducţiei electrice prin salt. Notând cu $A = C_t$ şi $B = 4\left[\frac{2\alpha^3}{9\pi kg(w_F)}\right]^{1/4}$, expresia conductivităţii electrice corespunzătoare mecanismului de conducţie prin salt este:

$$\sigma_{salt} = A\exp\left(B/T^{1/4}\right). \tag{2.66}$$

Aşa cum era de aşteptat, conform expresiei (2.66), σ_{salt} depinde de temperatură. De fapt, influenţa temperaturii se face simţită numai într-o parte a acestui mecanism complex de conducţie şi anume în procesul de excitare termică a electronilor. Expresia (2.66) a fost validată experimental într-un număr important de încercări.

c) Mecanismul de conducţie Poole – Frenkel

Acest mecanism de conducţie care se produce în volumul izolatorilor solizi are la bază reducerea înălţimii barierelor de energie corespunzătoare

defectelor pe care sunt fixaţi electronii, ca urmare a acţiunii câmpului electric. Aşa cum s-a descris anterior, în cazul izolatorilor reali, banda interzisă Fermi (definită la izolatorii cristalini sau la semiconductori) este înlocuită de o bandă de mobilitate care conţine foarte multe stări de energie localizate. Aceste stări pot fi introduse, printre altele, de impurităţi donoare sau de impurităţi acceptoare.

Pentru a explica mecanismul de conducţie *Poole – Frenkel* considerăm cazul unei impurităţi donoare (o particulă neutră în stare neionizată). Când un electron de valenţă părăseşte particula, aceasta devine ion pozitiv şi între electron şi particula ionizată apare forţa coulombiană:

$$F(r) = -\frac{q_0^2}{4\pi\varepsilon r^2}, \tag{2.67}$$

în care r reprezintă distanţa electron – ion. Energia potenţială $U(r)$ ce caracterizează interacţiunea electron-ion este egală cu produsul dintre $F(r)$ şi r:

$$U(r) = -\frac{q_0^2}{4\pi\varepsilon r} \tag{2.68}$$

şi are reprezentarea grafică din fig. 2.17 – *a*. În absenţa câmpului electric, înălţimea barierei pe care electronul trebuie să o escaladeze pentru a ieşi din groapa de potenţial este aceiaşi indiferent de sensul de deplasare.

Dacă se stabileşte un câmp electric E, asupra electronului se exercită şi forţa electrostatică $\vec{F}_e = q_0\vec{E}$ şi energia sa potenţială se modifică:

$$U(r) = -\frac{q_0^2}{4\pi\varepsilon r} - q_0 E r\,. \tag{2.70}$$

Prin anularea primei derivate a energiei $U(r)$ în raport cu r se poate obţine distanţa r_m electron – ion pentru care energia potenţială prezintă un maxim:

$$\frac{dU(r)}{dr} = \frac{q_0^2}{4\pi\varepsilon r^2} - q_0 E = 0\,, \tag{2.71}$$

din care rezultă:

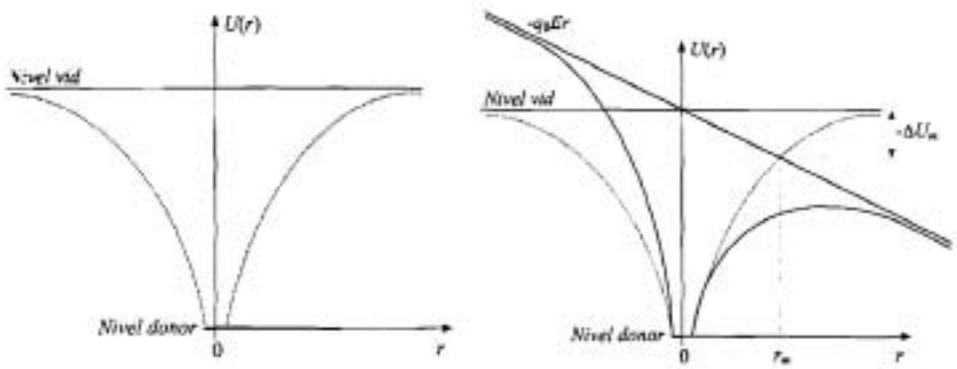


Fig. 2.17. Variaţia energiei potenţiale a unui electron datorată atracţiei coulombiene şi a câmpului electric E în vecinătatea unei impurităţi donoare ionizate; *a* – în absenţa câmpului electric; *b* - în prezenţa unui câmp electric intens.

$$r_m = \left(\frac{q_0}{4\pi\varepsilon E}\right)^{1/2}. \tag{2.72}$$

Din (2.70) şi ţinând cont de (2.72), rezultă că datorită acţiunii câmpului electric, bariera de potenţial se înclină şi scade în sensul axei Or cu ΔU_m:

$$\Delta U_m = 2\left(\frac{q_0^{\,3} E}{4\pi\varepsilon}\right)^{1/2}. \tag{2.73}$$

Probabilitatea ca un electron fixat într-o astfel de groapă de potenţial de adâncime Φ_0 să escaladeze bariera corespunzătoare este de forma:

$$P = C\exp\left(-\frac{\Phi_0 - \Delta U_m}{kT}\right), \tag{2.74}$$

în care C este o constantă care depinde de densitatea de volum a stărilor localizate. Densitatea curentului electric corespunzător acestui mecanism de conducţie este proporţională cu numărul de electroni ce escaladează bariera de potenţial în unitatea de timp. Prin urmare, ţinând cont de (2.74), expresia densităţii curentului electric se poate scrie:

$$J_{PF} = J_0 \exp\left(-\frac{\Phi_0 - \beta_{PF} E^{1/2}}{kT}\right), \tag{2.75}$$

în care J_0 este o constantă și $\beta_{PF} = 2\left(\frac{q_0^3}{4\pi\varepsilon}\right)^{1/2}$.

Pentru recunoașterea efectului *Poole-Frenkel*, experimental se trasează dreptele $\ln J = f(E^{1/2})$ cu panta β_{PF}/kT și $\ln J = f(1/T)$ care are panta $\left(-\Phi_0 + \beta_{PF} E^{1/2}\right)/k$. Pe baza rezultatelor experimentale, este totuși dificil să se facă o distincție clară între mecanismul *Poole-Frenkel* și mecanismul de injecție *Schottky*.

2.4. Polarizarea electrică

Sub acțiunea câmpului electric materialele electroizolante care intră în componența sistemelor de izolație se polarizează, adică în interiorul lor apar momente electrice. Fenomenul de polarizare este caracterizat cu ajutorul mărimii fizice vectoriale numită *polarizație*, care se definește ca fiind suma momentelor electrice elementare din unitatea de volum a corpului:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\sum_i (\vec{p}_i)_{\Delta V}}{\Delta V}, \tag{2.76}$$

în care $\vec{p}_i$ reprezintă momentul electric elementar i.

Polarizația electrică poate fi temporară $\vec{P}_t$ sau permanentă $\vec{P}_p$. Polarizația temporară se anulează odată cu încetarea acțiunii câmpului electric, în timp ce polarizația permanentă este independentă de câmp. Prin urmare, polarizația totală a unui corp se exprimă prin relația:

$$\vec{P} = \vec{P}_p + \vec{P}_t. \tag{2.77}$$

Legea polarizației temporare constituie relația de legătură dintre $\vec{P}_t$ și intensitatea câmpului electric aplicat dielectricului:

$$\vec{P}_i = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E}, \tag{2.78}$$

în care χ_e reprezintă susceptivitatea electrică a materialului (mărime scalară și adimensională în cazul corpurilor izotrope și tensorială, de ordinul II pentru cele anizotrope). Utilizând legea legăturii în câmp electric și relația (2.78), rezultă:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \\ &= \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_i + \vec{P}_p \\ &= \varepsilon \vec{E} + \vec{P}_p \end{aligned}, \tag{2.79}$$

în care $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ este permitivitatea absolută a materialului și $\varepsilon_r = \chi_e + 1$ este permitivitatea relativă.

Materialele electroizolante se împart în două clase: *polare* și *nepolare* după cum particulele lor constituente (moleculele) sunt polare, adică au moment electric permanent nenul, respectiv nepolare. Așa cum se va arăta în cele ce urmează, datorită mecanismelor de polarizare (claselor de polarizare) existente în corpurile polare, permitivitatea relativă a acestora este mai mare decât cea a corpurilor nepolare. De asemenea, se constată că permitivitatea relativă a lichidelor polare este mai mare decât cea a materialelor electroizolante solide. Pentru gaze $\varepsilon_r \cong 1$, respectiv susceptivitatea $\chi_e \cong 0$.

Câmpul electric $\vec{E}_0$ care se exercită la nivel microscopic asupra unui atom, ion sau molecule se numește *câmp interior* (sau *activ*) și diferă de câmpul macroscopic $\vec{E}$ aplicat din exterior. Expresia cu ajutorul căreia se poate calcula $\vec{E}_0$ este:

$$\vec{E}_0 = \vec{E} + \frac{\gamma}{\varepsilon_0} \vec{P}, \tag{2.80}$$

în care γ este un coeficient specific fiecărui material în parte (pentru gaze $\gamma = 0$ și pentru corpurile cristaline cu simetrie structurală sferică $\gamma = 1/3$).

Există trei mecanisme de polarizare: *electronică*, *ionică* și de *orientare*. Acestor trei mecanisme de polarizare le corespund respectiv *polarizația electronică*, *polarizația ionică* și *polarizația de orientare*.

Polarizațiile electronică și de orientare se mai numesc și polarizații de deformare. În sistemele de izolație neomogene se definește și *polarizația de neomogenitate* care constă practic în intensificarea celor trei mecanisme de polarizare amintite mai sus datorită câmpului electric produs de sarcinile electrice, care se separă pe suprafețele de discontinuitate dintre regiunile omogene.

2.4.1. Polarizarea în câmpuri electrice invariabile în timp

În cazul sistemelor de izolație supuse acțiunii câmpurilor electrice continue și constante în timp, asupra particulelor constituente (în funcție de structura corpului molecule, ioni, electroni) se exercită forțe de natură electrice $\vec{F}_e = q\vec{E}_0$, orientate pe direcția câmpului. În aceste condiții, se spune că izolațiile se polarizează în câmp continuu (tensiune continuă).

2.4.1.1. Polarizarea de deformare electronică

Acest mecanism de polarizare este prezent în toate sistemele de izolație și constă în inducerea unor momente electrice atomice $\vec{p}_e$ ca urmare a deformării orbitalilor electronici ai atomilor corpurilor sub acțiunea câmpului electric. Corpurile care prezintă numai polarizație electronică sunt cele constituite dintr-un singur tip de atomi cum sunt cristalele atomice, gazele și lichidele monoatomice [1].

Momentele atomice induse de câmpul electric în aceste corpuri se pot exprima cu ajutorul expresiei:

$$\vec{p}_e = \alpha_e \vec{E}_0, \tag{2.81}$$

unde α_e se numește polarizabilitate electronică și are expresia [1]:

$$\alpha_e = 4\pi\varepsilon_0 R^3, \tag{2.82}$$

în care R este raza atomului. Conform relației de definiție a polarizației electrice, expresia polarizației electronice este:

$$\begin{aligned}\vec{P}_e &= N_e \vec{p}_e \\ &= \alpha_e N_e \vec{E}_0\end{aligned}, \tag{2.83}$$

în care N_e reprezintă concentraţia momentelor electrice atomice (concentraţia atomilor).

Permitivitatea relativă ε_{re} corespunzătoare polarizării de deformare electronică are următoare expresie [1]:

$$\varepsilon_{re} = 1 + \frac{\alpha_e N_e}{\varepsilon_0 - \gamma \alpha_e N_e} \tag{2.84}$$

şi, conform relaţiei lui Maxwell este egală cu pătratul indicelui de refracţie n al corpului ($\varepsilon_{re} = n^2$).

Polarizaţia electronică (polarizabilitatea α_e) nu este influenţată de temperatură pentru valori uzuale ale acesteia (polarizarea electronică se referă la deformarea învelişurilor electronice ale atomilor, adică la deplasarea electronilor legaţi, care sunt stabili şi a căror stare este puţin influenţată de temperatură). Prin urmare şi ε_{re}, respectiv $\chi_{e.e}$ sunt practic independente de temperatură.

2.4.1.2. Polarizarea de deformare ionică

Polarizarea ionică se produce în corpurile care au o structură ionică şi constă în deplasarea relativă a ionilor pozitivi şi negativi sub acţiunea câmpului electric. În izolaţiile în care se produce o polarizare ionică este, de asemenea, prezentă şi polarizarea de deformare electronică datorită deformării învelişurilor electronice ale ionilor.

Polarizabilitatea ionică α_i are următoarea expresie [1]:

$$\alpha_i = 8\pi\varepsilon_0 a^3, \tag{2.85}$$

în care a reprezintă distanţa medie dintre ioni (sau constanta reţelei cristaline în cazul cristalelor ionice). Polarizaţia ionică poate fi exprimată printr-o relaţie similară cu (2.83):

$$\begin{aligned} \vec{P}_i &= N_i \vec{p}_i \\ &= \alpha_i N_i \vec{E}_0 \end{aligned}, \tag{2.86}$$

în care $\vec{p}_i$ este momentul ionic indus şi N_i reprezintă concentraţia perechilor de ioni din corp.

Permitivitatea relativă corespunzătoare fenomenului de polarizare ionică ε_{ri} are următoarea expresie [1]:

$$\varepsilon_{ri} = 1 + \frac{\alpha_i N_i}{\varepsilon_0 - \gamma \alpha_i N_i}. \tag{2.87}$$

Polarizaţia ionică nu variază semnificativ cu temperatura. Astfel, α_i poate prezenta creşteri nesemnificative cu temperatura ca urmare a faptului că mişcarea de agitaţie termică intensă favorizează deplasările ionilor sub acţiunea câmpului electric. Pornind de la această observaţie, rezultă că şi ε_{ri}, respectiv $\chi_{e,i}$ cresc foarte uşor cu temperatura. Polarizaţia ionică este predominantă în raport cu polarizaţia electronică (care, aşa cu s-a spus, este prezentă în toate corpurile). Prin urmare rezultă că $\varepsilon_{ri} > \varepsilon_{re}$.

2.4.1.3. Polarizaţia de orientare

Polarizarea de orientare are loc numai în cazul corpurilor care conţin molecule polare (molecule asimetrice – care posedă moment electric spontan $\vec{p}_p$) şi constă în rotirea acestora sub acţiunea forţelor electrice exercitate de câmp. În cazul anumitor corpuri, câmpul electric determină numai o orientare a radicalilor polari ai moleculelor; se spune că are loc o *polarizare structurală* a corpului respectiv. Polarizaţia de orientare are expresia:

$$\begin{aligned} \vec{P}_o &= N_o \vec{p}_p \\ &= \alpha_o N_o \vec{E}_0 \end{aligned}, \tag{2.88}$$

în care N_o reprezintă concentraţia dipolilor electrici permanenţi şi α_o polarizabilitatea de orientare.

Polarizaţia de orientare creşte odată cu intensificarea câmpului

electric şi tinde asimptotic către o valoare maximă, care se obţine atunci când toate momentele electrice elementare sunt orientate în sensul câmpului electric aplicat.

Atât în cazul lichidelor cât şi al corpurilor solide polare, polarizarea de orientare este puternic influenţată de temperatură. Polarizabilitatea de orientare α_o are următoarele expresii [2]:

$$\alpha_0 = \frac{p_p^{\ 2}}{3kT}, \tag{2.89}$$

pentru gaze şi lichidele electroizolante, respectiv

$$\alpha_0 = \frac{p_p^{\ 2}\cos\beta}{3kT}, \tag{2.90}$$

pentru izolaţiile solide polare, în care β reprezintă unghiul dintre direcţia câmpului electric activ $\vec{E}_0$ şi direcţia preferenţială de orientare a momentelor electrice elementare $\vec{p}_p$, în absenţa câmpului electric. Expresia permitivităţii relative corespunzătoare polarizaţiei de orientare este [2]:

$$\varepsilon_{ro} = 1 + \frac{\alpha_o N_v}{\varepsilon_0 - \gamma\alpha_o N_v}. \tag{2.91}$$

La temperaturi uzuale, aşa cum rezultă din relaţiile (2.89) şi (2.90), polarizabilitatea de orientare (şi, prin urmare, polarizaţia de orientare şi ε_{ro}) scad hiperbolic cu temperatura. La unele lichide aflate la temperaturi mai scăzute, se constată că, într-o primă etapă, permitivitatea ε_{ro} creşte cu temperatura (la $T < T_{critic}$). Acest lucru se datorează faptului că la temperaturi scăzute lichidele în cauză prezintă vîscozităţi mari şi orientarea moleculelor în câmp este mai dificilă. Creşterea temperaturii determină o slăbire a legăturilor chimice dintre molecule, acestea rotindu-se mai uşor după direcţia câmpului electric. Pentru $T > T_{critic}$ creşterea agitaţiei termice conduce la scăderea lui ε_{ro}. În cazul solidelor polare, se constată că la temperaturi joase, moleculele polare sunt practic imobile, ele neputând fi orientate de câmpul electric. Creşterea temperaturii determină, ca şi în cazul gazelor şi lichidelor polare, o slăbire a legăturilor dintre molecule. Dacă

temperatura depășește valoarea corespunzătoare temperaturii de tranziție de fază de ordinul al II-lea, moleculele polare încep să se orienteze în câmp și permitivitatea ε_{ro} crește. Și în acest caz, dacă $T > T_{critic}$ agitația termică se intensifică și conduce la scăderea lui ε_{ro}.

2.4.1.4. Polarizația de neomogenitate

Polarizația de neomogenitate sau *interfacială* P_n este prezentă în corpurile neomogene (izolațiile stratificate) ale căror suprafețe de trecere de la o regiune la alta (de la un material la altul) se încarcă cu sarcină electrică atunci când corpul respectiv este supus acțiunii unui câmp electric. Datorită sarcinii electrice separate pe aceste suprafețe câmpul electric în interiorul corpului se intensifică și mecanismele de polarizare prezentate mai sus sunt favorizate. Prin urmare, polarizația de neomogenitate este o polarizație suplimentară care se manifestă în corpurile neomegene prin creșterea, după caz, a polarizației de deformare electronică și ionică sau a polarizației de orientare.

Matematic, polarizația de neomogenitate se poate defini ca fiind diferența dintre polarizația totală a unui corp după separarea sarcinii electrice pe suprafețele de discontrinuitate P_q și polarizația înainte de separarea sarcinii electrice P_0:

$$P_n = P_q - P_0. \tag{2.92}$$

2.4.2. Polarizarea în câmpuri electrice variabile în timp

În timpul funcționării mașinilor și echipamentelor electrice, marea majoritate a sistemelor de izolație ale acestora sunt supuse acțiunii câmpurilor electrice variabile în timp, mai exact, câmpurilor electrice armonice $E(t) = E_m \sin \omega t$. În aceste situații atât inducția electrică D cât și polarizația P sunt mărimi armonice defazate în urma intensității câmpului electric ($D(t) = D_m \sin(\omega t - \varphi_1)$, respectiv $P(t) = P_m \sin(\omega t - \varphi_2)$ - în care φ_1 și φ_2 sunt unghiurile de defazaj). Reprezentând în complex simplificat mărimile armonice E, D și P și ținând cont de legea polarizației temporare

(2.78) rezultă că, în acest caz susceptivitatea electrică χ_e, permitivitatea ε şi permitivitatea relativă ε_r sunt *mărimi complexe*:

$$\underline{\chi}_e = \frac{\underline{P}}{\varepsilon_0 \underline{E}} \tag{2.93}$$

respectiv,

$$\begin{aligned} \underline{\varepsilon}_r &= 1 + \underline{\chi}_e = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \\ \underline{\varepsilon} &= \varepsilon' - j\varepsilon'' \end{aligned} \tag{2.94}$$

Partea reală a permitivităţii relative ε_r' are aceeaşi semnificaţie fizică ca mărimea ε_r în câmpuri electrice invariabile în timp, fiind permitivitatea relativă care intră în calculul capacităţii condensatoarelor. Partea imaginară ε_r'' caracterizează pierderile dielectrice prin polarizare care se produc în izolaţii.

În izolaţiile supuse acţiunii câmpurilor electrice variabile, se constată existenţa unor fenomene specifice astfel încât ε_r' şi ε_r'' depind de frecvenţa câmpului electric aplicat (fig. 2.18). Astfel, în câmpuri electrice cu frecvenţe de $10^{13} - 10^{15}$ Hz se produc fenomene de rezonanţă datorită deplasării sarcinilor electrice (electroni şi ioni) sub acţiunea câmpului electric. Acestea determină variaţii bruşte ale permitivităţii şi chiar anularea sau schimbarea semnului acesteia. La frecvenţe de $10^7 - 10^{10}$ Hz apar fenomene de relaxare datorate oscilaţiilor dipolilor electrici, care determină scăderea permitivităţii relative ε_r'. De asemenea, şi în cazul frecvenţelor industriale au loc anumite fenomene care influenţează valorile permitivităţii printre care cel mai important este cel de relaxare a sarcinii spaţiale. În fig. 2.18 se observă că pentru valori ale frecvenţei depărtate de f_{0m}, f_{0a}, f_{0i}, şi f_{0e}, componentele permitivităţii complexe ε_r' şi ε_r'' nu prezintă variaţii semnificative. Mai mult, atunci când frecvenţa câmpului electric creşte dincolo de o anumită valoare, numnită *frecvenţă proprie*, dipolii caracteristici unei anumite clase de polarizaţie nu pot să mai urmărească variaţia rapidă a câmpului electric, orientarea lor devenind aleatoare şi, prin urmare, polarizaţia coresponzătoare nulă.

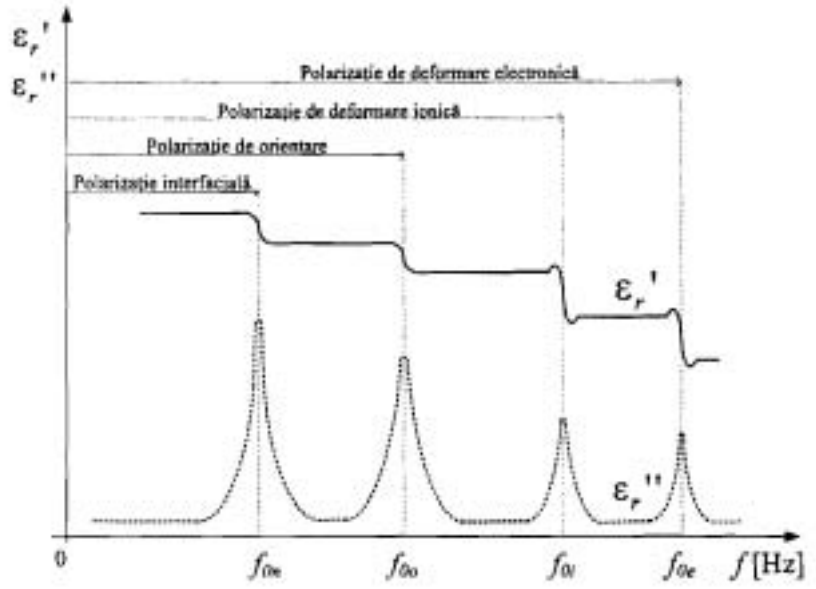


Fig. 2.18. Variaţia componentelor ε,' şi ε,'' în funcţie de frecvenţa câmpului electric.

2.4.2.1. Polarizarea de deformare în câmpuri armonice

În cazul câmpurilor electrice sinusoidale, deplasarea învelişurilor electronice ale atomilor (la polarizarea electronică) şi a ionilor (la polarizarea ionică) sunt, de asemenea, procese sinusoidale care se produc cu o frecvenţă egală cu cea a câmpului electric ($f = \omega/2\pi$). Obţinerea expresiilor matematice ale mărimilor ε_r' şi ε_r'' se poate face considerând că electronii, respectiv ionii, oscilează în jurul unor poziţii fixe şi că această mişcare poate fi asimilată cu cea a unui oscilator armonic liniar.

Considerăm cazul polarizaţiei de deformare electronice; mişcarea de oscilaţie a unui electron în jurul nucleului este descrisă de ecuaţia:

$$m_0 \frac{d^2x}{dt^2} = q_0 E_0(t) - F_f - F_k \ , \qquad (2.95)$$

în care x reprezintă deplasarea electronului cu masa $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg şi sarcina $q_0 = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, $F_k = k \cdot x$ este o forţă cuasielastică care tinde să readucă electronul în poziţia iniţială (k este o constantă de material) şi F_f

reprezintă o forţă de frânare a electronului prin care se ţine seama de faptul că electronul aflat în mişcare radiază energie electromagnetică şi, prin urmare, energia lui scade. Expresia forţei F_f este de forma [2]:

$$F_f = \varphi \frac{dx}{dt}, \tag{2.96}$$

în care φ este o mărime de material.

Dacă se notează cu N concentraţia de atomi ai corpului în care s-a stabilit câmpul electric activ E_0 şi ţinând cont de (2.80) şi (2.78) în care $\chi_e = \varepsilon_r - 1$, înmulţind ecuaţia (2.95) cu Nq_0Z şi trecând-o în complex simplificat se obţine:

$$\begin{aligned} &\omega^2 (Nq_0 Zx) = \\ &-\frac{Nq_0{}^2 Z}{m_0}\left[1+\gamma(\varepsilon_r - 1)\right]\underline{E} + \frac{k}{m_0}(Nq_0 Zx), \\ &+ j\omega \frac{\varphi}{m_0}(Nq_0 Zx), \end{aligned} \tag{2.97}$$

în care Z reprezintă numărul de ordine (numărul de electroni ai atomului). Produsul Nq_0Zx reprezintă polarizaţia electronică complexă $\underline{P_e}$. Notând $k/m_0 = \omega_0{}^2$ şi $\omega_0{}'^2 = \frac{k}{m_0} - \gamma \frac{Nq_0{}^2 Z}{m_0 \varepsilon_0}$ şi identificând partea reală şi cea imaginară a expresiei (2.97), rezultă:

$$\varepsilon_r{}' = 1 + \frac{Nq_0{}^2 Z}{m_0 \varepsilon_0} \cdot \frac{\omega_0{}'^2 - \omega^2}{\left(\omega_0{}'^2 - \omega^2\right)^2 + \omega^2 (\varphi/m_0)^2}, \tag{2.98}$$

$$\varepsilon_r{}'' = \frac{Nq_0{}^2 Z}{m_0 \varepsilon_0} \cdot \frac{\omega(\varphi/m_0)}{\left(\omega_0{}'^2 - \omega^2\right)^2 + \omega^2 (\varphi/m_0)^2}. \tag{2.99}$$

Mărimea $\omega_0{}'$ se numeşte *pulsaţie proprie* sau *pulsaţie de rezonanţă* şi este practic egală cu pulsaţia proprie de oscilaţie a electronilor (sau a ionilor, în cazul polarizaţiei de deformare ionică). Pentru câmpuri electrice invariabile în timp ($\omega = 0$), rezultă $\varepsilon_r{}'(0)$ care reprezintă valoarea statică ε_{rst} (permitivitatea care intervine în calculul capacităţii condensatoarelor):

$$\varepsilon_{r\infty} = 1 + \frac{Nq_0^2 Z}{m_0 \varepsilon_0}. \qquad (2.100)$$

Fig. 2.19 prezintă curbele de variaţie $\varepsilon_r'(\omega)$ şi $\varepsilon_r''(\omega)$ care arată că numai pentru valori ale pulsaţiei câmpului electric situate în imediata vecinătate a pulsaţiei proprii ω_0', ε_r' şi ε_r'' prezintă variaţii importante. De asemenea, se oobservă că pentru valori mari ale pulsaţiei $\varepsilon_r' \to 1$, ceea ce înseamnă că dielectricul nu mai este polarizat (la frecvenţe foarte înalte electronii, respectiv ionii, nu mai pot urmării oscilaţiile câmpului electric).

Rezultatele obţinute mai sus pentru polarizaţia de deformare electronică sunt valabile şi în cazul polarizaţiei de deformare ionică însă cu alte valori ale constantelor k şi φ.

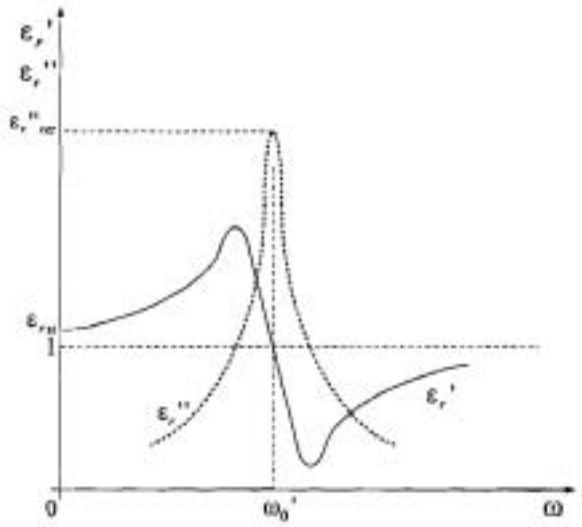


Fig. 2.19. Variaţia mărimilor ε_r' şi ε_r'' în funcţie de pulsaţia câmpului electric în cazul polarizaţiilor de deformare electronică şi ionică.

2.4.2.2. Polarizarea de orientare

În general, pentru caracterizarea polarizării de orientare în câmpuri electrice armonice este admis modelul *Pellat-Debye*, în care se consideră că orientarea dipolilor este un proces pur vâscos, în care nu intervin forţe

elastice. Prin urmare, ecuaţia de mişcare a unei molecule polare aflate într-un câmp electric armonic poate fi caracterizată cu ajutorul unei relaţii asemănătoare cu (2.95) din care lipseşte forţa F_k. Astfel, notând cu m şi q masa şi respectiv sarcina unei molecule polare, rezultă ecuaţia diferenţială:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{qE_0}{m} - \frac{\varphi}{m} v, \tag{2.101}$$

a cărei soluţie arată că viteza de mişcare a moleculei creşte exponenţial în timp până la atingerea unei valori maxime qE/φ, cu constanta de timp $\tau = m/\varphi$.

Prin analogie, în modelul *Pellat-Debye* se consideră că valoarea polarizaţiei de orientare la un moment de timp dat $P_o(t)$ tinde la o valoare de echilibru P_{o_∞} cu o viteză proporţională cu diferenţa $P_o - P_o(t)$. Conform acestei ipoteze, rezultă [13]:

$$\frac{dP_o(t)}{dt} = C\left[P_{o_\infty} - P_o(t)\right], \tag{2.102}$$

cu soluţia:

$$P_o(t) = P_{o_\infty}\left[1 - \exp(-Ct)\right], \tag{2.103}$$

unde constanta C reprezintă inversul duratei de relaxare $\tau = 1/C$.

Se consideră un dielectric polar supus acţiunii unui câmp electric invariabil în timp (static). Dipolii se orientează după direcţia câmpului electric, permitivitatea relativă luând valoarea ε_{rs}, iar polarizaţia valoarea P_s. În cazul unor câmpuri electrice variabile de frecvenţă foarte înaltă, moleculele polare nu mai pot urmării variaţia câmpului şi contribuţia mecanismului de polarizare de orientare este neglijabilă. În acest caz numai polarizaţiile de deformare electronică, respectiv ionică intervin, acestea prezentând răspunsuri foarte rapide la acţiunea câmpului electric. În consecinţă, permitivitatea şi polarizaţia iau valorile $\varepsilon_{r\infty}$, respectiv P_∞.

Dacă se aplică un câmp treaptă unui dielectric polar, polarizaţia totală se poate exprima astfel:

$$P = P_o + P_{def} = P_o + P_\infty, \tag{2.104}$$

din care, utilizând legea polarizaţiei temporare (2.78) rezultă că:

$$P_o = \varepsilon_0(\varepsilon_n - \varepsilon_\infty)E_0. \tag{2.105}$$

Se consideră acum cazul unui material electroizolant polar supus acţiunii unui câmp electric sinusoidal $E(t) = E_0 \sin(\omega t)$. Polarizaţia corpului va fi o mărime complexă:

$$\underline{P}(t) = \underline{P}_o(t) + \underline{P}_\infty(t). \tag{2.106}$$

Înlocuind P_o din (2.105) în (2.102) şi trecând în complex simplificat, rezultă:

$$\underline{P}_o(t) = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_n - \varepsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau}\underline{E}(t). \tag{2.107}$$

Ţinând cont de (2.106) şi de $\underline{D}(t) = \varepsilon_0 \underline{E}(t) + \underline{P}(t)$, rezultă:

$$\begin{aligned}\underline{D}(t) = \varepsilon_0 \underline{E}(t) + \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_n - \varepsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau}\underline{E}(t) \\ + \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1)\underline{E}(t)\end{aligned}, \tag{2.108}$$

din care:

$$\underline{\varepsilon}_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\omega}, \tag{2.109}$$

numită *relaţia lui Debye*.

Componentele permitivităţii complexe corespunzătoare polarizării de orientare sunt:

$$\varepsilon_r' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \tag{2.110}$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{(\varepsilon_n - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}. \tag{2.111}$$

Trebuie menţionat că modelul *Pellat – Debye* se aplică, mai cu seamă, polarizării lichidelor polare. Cu toate acestea, rezultatele de mai sus pot fi aplicate şi pentru izolatorii solizi, cu observaţia că în acest caz trebuie considerat un spectru larg al duratei de relaxare τ.

Dependenţa permitivităţii relative complexe de frecvenţa câmpului electric este pusă în vedere prin trasarea diagramelor *Cole-Cole* - $\varepsilon_r''(\varepsilon_r')$.

Pentru aceasta sunt utilizate expresiile (2.110) şi (2.111), care prin ridicare la pătrat şi adunare membru cu membru, conduc la următoarea relaţie:

$$(\varepsilon_r'-\varepsilon_{r\infty})^2+\varepsilon_r''^2=\frac{(\varepsilon_{rs}-\varepsilon_{r\infty})^2}{1+\omega^2\tau^2}. \qquad (2.112)$$

Dacă se elimină $1+\omega^2\tau^2$ între (2.110) şi (2.112) se obţine următoarea expresie:

$$(\varepsilon_r')^2-(\varepsilon_{rs}-\varepsilon_{r\infty})\varepsilon_r'+\varepsilon_{rs}\varepsilon_{r\infty}+(\varepsilon_r'')^2=0, \qquad (2.113)$$

Reprezentarea permitivităţii complexe în planul complex (ε_r' , ε_r'') este un semicerc cu centrul în punctul C de coordonate $(\varepsilon_{r\infty}+\varepsilon_{rs})/2$ şi $(\varepsilon_{rs}-\varepsilon_{r\infty})/2$ – fig. 2.20.

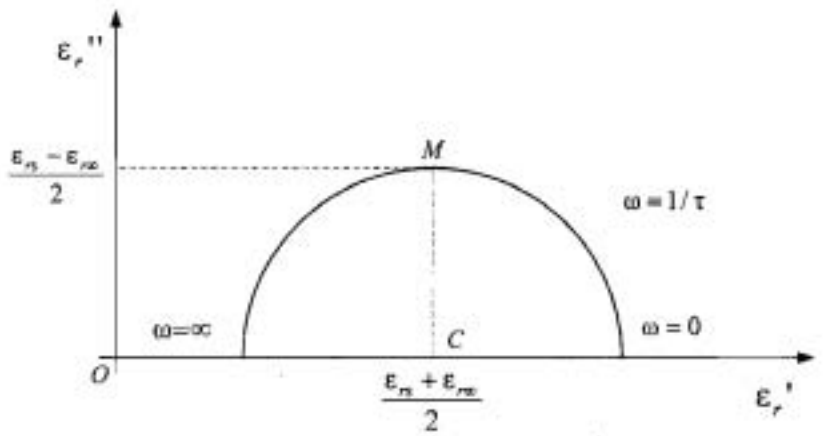


Fig. 2.20. Diagrama *Cole – Cole* pentru un dielectric polar.

În practică se constată că izolatorii solizi polari sunt caracterizaţi prin spectre ale duratelor de relaxare τ. În acest caz, expresia permitivităţii relative complexe poate fi scrisă:

$$\underline{\varepsilon}_r=\varepsilon_r'-j\varepsilon_r''=\varepsilon_{r\infty}+\frac{\varepsilon_{rs}-\varepsilon_{r\infty}}{(1+j\omega\tau_m)^{1-\alpha}}, \qquad (2.114)$$

în care τ_m este durata de relaxare medie şi $\alpha\in(0, 1)$ este o constantă de material. În această situaţie centrul semicercului reprezentat în fig. 2.20 se poate afla sub abscisă.

2.4.2.3. Polarizarea de neomogenitate

În majoritatea cazurilor, sistemele de izolaţie ale maşinilor şi echipamentelor electrice sunt realizate din mai multe materiale electroizolante cu aceeaşi stare de agregare sau cu stări de agregare diferite. Prin urmare, acestea prezintă o structură neomogenă, motiv pentru care, pe suprafeţele de discontinuitate se separă sarcină electrică adevărată. În câmpuri electrice variabile în timp are loc o *relaxare* a acestei sarcini.

Într-adevăr, dacă se consideră cazul unui sistem de izolaţie alcătuit din n straturi omogene cu proprietăţi dielectrice cunoscute, aflat între doi electrozi metalici, la aplicarea unei tensiuni treaptă în circuit apare un curent electric a cărui valoarea, în primele momente, corespunde încărcării celor n condensatoare înseriate, valoarea sa fiind determinată de permitivităţile celor n straturi. În regim permanent, valoarea curentului din circuit depinde de valorile conductivităţilor electrice ale celor n straturi. Prin urmare, între curentul capacitiv iniţial stabilit în sistemul de izolaţie şi cel rezistiv corespunzător regimului staţionar, se produce fenomenul de relaxare amintit anterior.

Pentru explicarea acestui fenomen se consideră cazul cel mai simplu al unui sistem de izolaţie alcătuit din două straturi omogene cu grosimile d_1 şi d_2 şi permitivităţile ε_1, şi ε_2, respectiv conductivităţile σ_1 şi σ_2 (fig. 2.21).

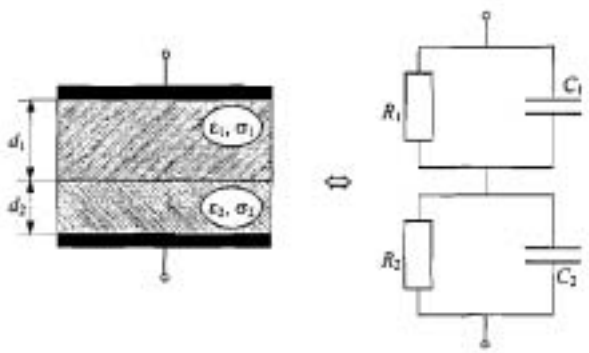


Fig. 2.21. Sistem de izolaţie (condensator) compus din două straturi omogene şi schema electrică echivalentă.

Ansamblul prezentat în fig. 2.21 împreună cu schema echivalentă este cunoscut, în literatura de specialitatea, sub numele de modelul lui *Maxwell – Wagner* [2]. Pentru simplificare se consideră că aria comună a armăturilor condensatorului este egală cu unitatea. Rezultă că mărimile care intervin în schema echivalentă sunt: $R_1 = d_1/\sigma_1$, $R_2 = d_2/\sigma_2$, $C_1 = \varepsilon_1/d_1$ şi $C_2 = \varepsilon_2/d_2$. Dacă constantele de timp ale celor două condensatoare $\tau_1 = R_1C_1$ şi $\tau_2 = R_2C_2$ (care reprezintă şi duratede de relaxare ale celor două izolatoare $\tau_1 = \varepsilon_1/\sigma_1$, respectiv $\tau_2 = \varepsilon_2/\sigma_2$) sunt egale, pe suprafaţa de separaţie dintre cele două straturi nu se acumulează sarcină electrică, deci nu apar fenomene de relaxare.

Dacă între cei doi electrozi metalici se aplică o tensiune armonică cu pulsaţia ω, admitanţa circuitului echivalent al primului strat este:

$$\underline{Y}_1 = \frac{\sigma_1}{d_1} + j\omega\frac{\varepsilon_1}{d_1}, \tag{2.115}$$

şi poate fi înlocuită cu un condensator de capacitate complexă $\underline{C}_1 = \underline{\varepsilon}_1 / d_1$ a cărui admitanţă $\underline{Y}_{1c} = j\omega\underline{C}_1$ este egală cu $\underline{Y}_1$:

$$\frac{\sigma_1}{d_1} + j\omega\frac{\varepsilon_1}{d_1} = j\omega\frac{\underline{\varepsilon}_1}{d_1}, \tag{2.116}$$

din care se poate stabili expresia permitivităţii complexe $\underline{\varepsilon}_1$:

$$\underline{\varepsilon}_1 = \frac{1 + j\omega\tau_1}{j\omega\tau_1}\varepsilon_1. \tag{2.117}$$

În mod cu totul asemănător se poate exprima şi permitivitatea complexă $\underline{\varepsilon}_2$. Schema echivalentă prezentată în fig. 2.21 poate fi înlocuită cu o capacitate complexă echivalentă $\underline{C}$ corespunzătoare capacităţilor $\underline{C}_1$ respectiv $\underline{C}_2$ care sunt conectate în serie. Cum capacitatea $\underline{C} = \underline{\varepsilon} / d$ (în care $d = d_1 + d_2$), se obţine:

$$\frac{d}{\underline{\varepsilon}} = \frac{j\omega\tau_1}{1 + j\omega\tau_1}\cdot\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{j\omega\tau_2}{1 + j\omega\tau_2}\cdot\frac{d_2}{\varepsilon_2}. \tag{2.118}$$

Din relaţia (2.118) rezultă:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} - j\frac{\varepsilon_0}{\omega\tau_0}, \tag{2.119}$$

în care s-au făcut următoarele notații:

$$\varepsilon_\infty = \frac{d_1\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}, \tag{2.120}$$

$$\varepsilon_s = d\frac{d_1\varepsilon_1\sigma_2^2 + d_2\varepsilon_2\sigma_1^2}{(d_2\sigma_1 + d_1\sigma_2)^2}, \tag{2.121}$$

$$\tau = \frac{d_1\varepsilon_2 + d_2\varepsilon_1}{d_2\sigma_1 + d_1\sigma_2}, \tag{2.122}$$

$$\tau_0 = \frac{\varepsilon_0}{d}\frac{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}{\sigma_1\sigma_2}. \tag{2.123}$$

În membrul drept al expresiei (2.119) ultimul termen corespunde fenomenului de conducție electrică în cele două straturi. În cazul în care constantele de timp ale componentelor sistemului de izolație τ_1 și τ_2 sunt egale, al doilea termen din membrul drept al expresiei (2.119) se anulează și se obține:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \frac{d\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} - j\frac{\varepsilon_0}{\omega\tau_0}. \tag{2.124}$$

Din expresia (2.124) rezultă că partea reală a permitivității ε' este independentă de frecvența câmpului electric în timp ce, ε'' variază invers proporțional cu aceasta. În cazul în care unul dintre straturile sistemului de izolație considerat în fig. 2.21 este un izolator foarte bun, cu o valoare a rezistivității foarte mare ($\sigma_1 \to \infty$), rezultă, conform expresiei (2.123) că $\tau_0 \to 0$ ceea ce conduce, în acord cu relația (2.124) la anularea părții imaginare ε'' a permitivității complexe.

Modelul clasic *Maxwell – Wagner* prezentat mai sus poate fi completat prin considerarea unei structuri a sistemului de izolație mai

apropiată de cazurile întâlnite în realitate: combinaţii între straturi electroizolante dispuse paralel cu electrozii, respectiv perpendicular pe aceştia, cuburi sau sfere cu proprietăţi diferite conţinute într-un mediu dielectric omogen, distribuţii statistice de particule dispersate într-un dielectric, etc. Astfel, rezultă expresii matematice foarte complexe ale componentelor ε' şi ε'' aplicabile la frecvenţe relativ joase ale câmpului electric.

3. STRĂPUNGEREA SISTEMELOR DE IZOLAŢIE

3.1. Noţiuni generale

În anumite condiţii, sistemele de izolaţie ale maşinilor şi echipamentelor electrice îşi pierd rolul fundamental şi anume acela de a izola din punct de vedere electric conductoarele aflate la potenţiale electrice diferite. In astfel de situaţii se spune că a avut loc *străpungerea* izolaţiei. Acest lucru se întâmplă atunci când tensiunea electrică aplicată depăşeşte o anumită valoare cunoscută sub numele de *tensiune de străpungere* (U_{str}). În realitate, factorul principal care conduce la apariţia fenomenului de străpungere este câmpul electric. Se constată că străpungerea unei izolaţii se produce atunci când valoarea locală a intensităţii câmpului electric depăşeşte o valoare maximă caracteristică acelei izolaţii.

În cazul materialelor electroizolante se defineşte *rigiditatea dielectrică* E_{str}, care reprezintă valoarea minimă a intensităţii câmpului electric la care are loc străpungerea materialului (sau valoarea maximă a intensităţii câmpului electric la care materialul electroizolant rezistă fără a se străpunge). Unul dintre criteriile de bază utilizate la alegerea materialelor electroizolante care intră în componenţa unui sistem de izolaţie este reprezentat de valoarea rigidităţii dielectrice. Cu toate acestea, rigiditatea dielectrică nu reprezintă o mărime de material *intrinsecă*, pentru că fenomenul de străpungere este influenţat de numeroşi factori printre care amintim: gradul de omogenitate al materialului, umiditatea, temperatura, prezenţa incluziunilor gazoase şi a altor impurităţi, caracteristicile câmpului electric aplicat (frecvenţa, viteza de creştere, durata de aplicare), forma şi dimensiunile electrozilor metalici între care este plasat materialul, etc. Ţinând cont de toate aceste aspecte, rigiditatea dielectrică a materialelor electroizolante se determină experimental în anumite condiţii foarte bine precizate, indicate în normele şi standardele aflate în vigoare.

În cele ce urmează vor fi prezentate aspectele esențiale referitoare la producerea fenomenului de străpungere în sistemele de izolație, mecanismele de străpungere caracteristice izolațiilor gazoase, lichide și solide și factorii care influențează producerea acestui fenomen.

3.2. Străpungerea gazelor

Aspectele de bază privind fenomenul de conducție electrică precum și natura purtătorilor de sarcină din gaze au fost prezentate în paragraful §2.3.2. Conform acestora, în cazul câmpurilor electrice foarte intense, în gaze au loc descărcări autonome; astfel, sub acțiunea câmpului electric, moleculele de gaz sunt ionizate prin ciocnire rezultând noi purtători de sarcină.

Dacă intensitatea câmpului este suficient de mare se produce o multiplicare în avalanșă a purtătorilor de sarcină ceea ce, în final, conduce la străpungerea gazului. Acest fenomen are la bază existența unui electron „germene" rezultat fie datorită factorilor de ionizare externi, fie prin injecție de sarcină la electrozi. Sub acțiunea câmpului electric, electronul germene (numit *electron incident*) este puternic accelerat și energia sa cinetică devine suficient de mare astfel încât, prin ciocnire, ionizează o moleculă neutră de gaz și determină apariția unui alt electron liber (numit *electron extras*). Cei doi electroni (incident și extras), accelerați de câmpul electric produc, prin ciocniri, alți electroni, astfel încât, după n ciocniri, rezultă un număr de 2^n electroni. În realitate, lucrurile se produc mai rapid, numărul inițial de electroni din gaz fiind mult mai mare [23].

Fenomenul de străpungere a gazelor este caracterizat cu ajutorul teoriei lui *Townsend*. Dacă se presupune că în unitatea de timp catodul emite n_0 electroni și că numărul de electroni rezultați la distanța x față de catod este $n(x)$, pe distanța dx aceștia vor genera, prin ciocniri, $dn(x)$ electroni:

$$dn(x) = n(x) \cdot \alpha \cdot dx \,, \tag{3.1}$$

în care α reprezintă numărul mediu de ionizări produse de un electron pe

unitatea de lungime, numit şi *cifra de ionizare* sau *primul coeficient de ionizare al lui Townsend.* Cum la suprafaţa catodului ($x = 0$) $n(x) = n_0$ prin integrare se obţine expresia numărului de electroni liberi rezultaţi la o distanţă x faţă de catod:

$$n(x) = n_0 \exp(\alpha x). \tag{3.2}$$

Se constată că valoarea coeficientului α depinde de intensitatea câmpului electric E şi de densitatea relativă a gazului δ (care la rândul ei depinde de presiunea p şi temperatura T la care se află gazul). În fig. 3.1 sunt prezentate curbele de variaţie ale primului coeficient de ionizare α în funcţie de intensitatea câmpului electric pentru mai multe valori ale densităţii δ a aerului. Astfel, se poate constata că valoarea coeficientului α scade atunci când densitatea aerului creşte.

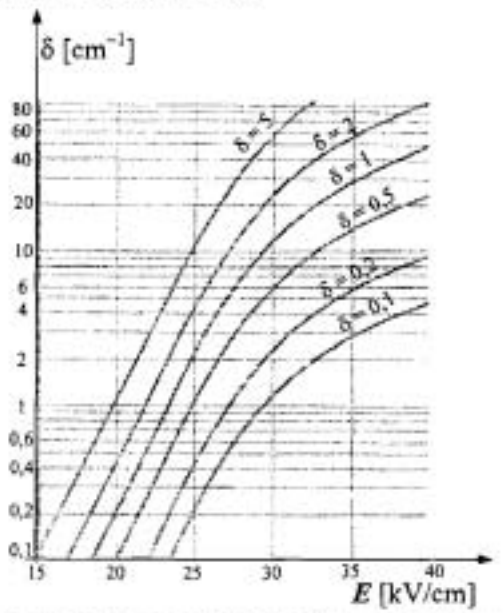


Fig. 3.1. Variaţia primului coeficient de ionizare al lui *Townsend* în funcţie de intensitatea câmpului electric E şi de densitatea relativă δ a aerului [3].

Moleculele anumitor gaze, cum ar fi cele electronegative, prezintă o afinitate electronică ridicată. Prin urmare, o parte dintre electronii liberi care participă la fenomenul de ionizare este captată de moleculele de gaz,

rezultând astfel ioni negativi. Pentru a ține cont de acest fenomen, în teoriile referitoare la conducția și străpungerea gazelor se introduce un *coeficient de atașament* η, care reprezintă numărul de electroni capturați de moleculele de gaz pe unitatea de lungime. În consecință, pentru gazele electronegative, relația (3.2) devine:

$$n(x) = n_0 \exp(\alpha - \eta)x . \tag{3.3}$$

Un alt fenomen important care intervine în procesul de străpungere se numește *emisie secundară la catod* și constă în emisia de electronii datorită bombardării catodului de către ionii pozitivi accelerați de câmpul electric și care iau naștere datorită norului electronic care se deplasează spre anod, dar și datorită efectului fotoelectic produs de moleculele de gaz excitate. În realitate, cum intervalul de timp scurs între momentul aplicării tensiunii și momentul de apariție a străpungerii este foarte scurt ($\sim 10^{-6}$ s) iar ionii sunt lenți (în aer mobilitatea acestora este aproximativ $2{,}4 \cdot 10^{-4}$ m^2/Vs), rezultă că, practic numărul de electroni generați prin bombardament ionic la catod este foarte mic. Prin urmare, producerea electronilor secundari este atribuită aproape în întregime fotonilor generați în interiorul gazului. Pentru a ține seama de acest fenomen, în teoria lui *Townsend* se definește *coeficientul* de ionizare secundară γ, numit și *al doilea coeficient* al lui *Townsend*.

Plecând de la aceste considerente și efectuând câteva calcule simple se poate stabili criteriul de străpungere *Townsend* pentru gaze. Astfel, dacă se consideră că cei $n(x)$ electroni aflați la distanța x față de catod produc pe distanța dx $\alpha n(x)dx$ electroni prin ionizare directă (ciocniri) și $\omega n(x)dx$ electroni suplimentari la catod, numărul total de electroni emiși în unitatea de timp la catod este n_0':

$$n_0' = n_0 + \int_0^d \omega n(x)dx , \tag{3.4}$$

în care ω este un coeficient și d reprezintă distanța dintre catod și anod. Ținând cont de (3.2) $n(x) = n_0' \exp(\alpha x)$ și

$$n_0' = n_0 + \int_0^d \omega n_0' \exp(\alpha x)dx = n_0 + \frac{\omega}{\alpha} n_0' [\exp(\alpha d) - 1]. \tag{3.5}$$

rezultă că numărul de electroni ajunşi la anod este:

$$n(d) = \frac{n_0 \exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d) - 1]}, \tag{3.6}$$

în care $\gamma = \omega/\alpha$ este cel de-al doilea coeficient de ionizare al lui *Townsend*. Relaţia (3.6) permite obţinerea expresiei intensităţii curentului electric care ajunge la anod:

$$i_d = \frac{i_0 \exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d) - 1]}, \tag{3.7}$$

în care i_0 reprezintă intensitatea curentului emis de catod.

Din relaţia (3.7) rezultă că există o valoare critică a distanţei dintre electrozi d_s, pentru care intensitatea curentului i_d devine foarte mare (tinde către infinit), adică se produce fenomenul de străpungere a gazului:

$$1 - \gamma[\exp(\alpha d_s) - 1] = 0. \tag{3.8}$$

Deoarece $\exp(\alpha d_s) >> 1$, relaţia (3.8) poate fi scrisă astfel:

$$\gamma \exp(\alpha d_s) = 1, \tag{3.9}$$

şi reprezintă *criteriul de străpungere* al lui *Townsend*.

Ţinând cont de faptul că primul coeficient de ionizare al lui *Townsend* depinde de E şi δ (fig. 3.1), în realitate, pentru fiecare valoare a raportului E/δ se poate determina o valoare a distanţei critice d_s şi o valoare a tensiunii de străpungere U_{str}.

În practică gazele nu sunt întotdeauna supuse unor câmpuri electrice uniforme. Spre exemplu, dacă se consideră cazul unui câmp electric puternic divergent creat cu ajutorul unui sistem de electrozi ac – plan, dinamica fenomenului de străpungere a unui gaz diferă faţă de cea descrisă anterior. Astfel, chiar în cazul unor distanţe mari între cei doi electrozi, în zona adiacentă acului intensitatea câmpului electric ia valori foarte

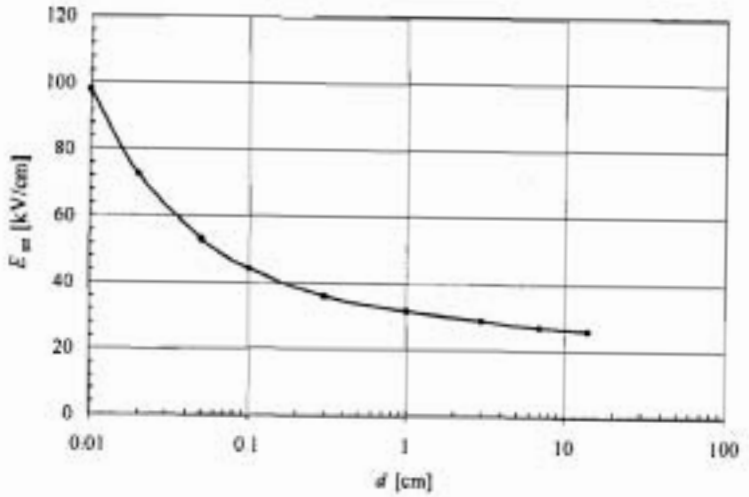


Fig. 3.2. Variaţia rigidităţii dielectrice a aerului în câmp electric uniform în funcţie de distanţa dintre electrozi [3].

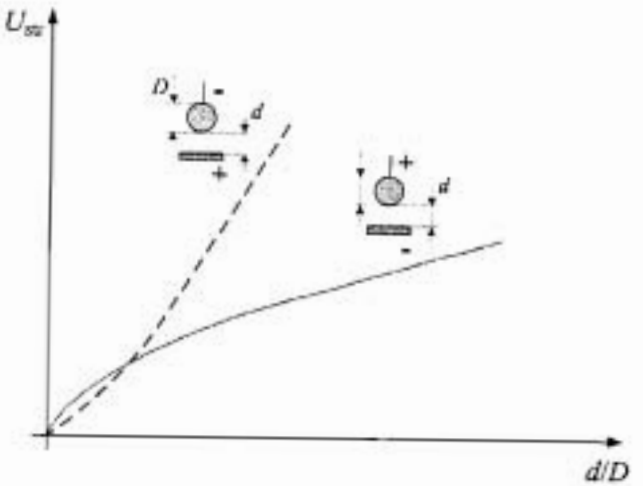


Fig. 3.3. Variaţia tensiunii de străpungere a aerului în funcţie de raportul d/D pentru polarităţi diferite în sistemul de electrozi sferă – plan (d şi D reprezintă distanţa dintre electrozi respectiv diametrul electrodului sferic) [3].

3.3. Străpungerea lichidelor

Așa cum s-a arătat și în cazul gazelor, străpungerea lichidelor electroizolante se produce în cazul în care tensiunea electrică aplicată între doi electrozi depășește valoarea numită *tensiune de străpungere*, U_{str}, respectiv dacă intensitatea câmpului electric este cel puțin egală cu *rigiditatea dielectrică*, E_{str}.

Studiile efectuate asupra fenomenului de străpungere a lichidelor au evidențiat faptul că impuritățile (particule solide sau gazele dizolvate) prezente în lichidele electroizolante joacă un rol fundamental. În cazul dielectricilor lichizi care conțin impurități, străpungerea se datorează, ca și în cazul gazelor, unui mecanism de ionizare prin ciocnire. Întrucât drumul liber mijlociu al purtătorilor de sarcină este, în acest caz, mult mai mic decât în cazul gazelor (lichidele fiind mai dense), rigiditatea dielectrică este mult mai ridicată, putând atinge 100 MV/m.

În cazul dielectrici lichizi utilizați curent în sistemele de izolație (de puritate tehnică), rigiditatea dielectrică este însă mult mai mică datorită impurităților cum ar fi: apa, bule de gaze, particule mecanice fine, etc. Sub acțiunea câmpului electric, aceste impurități având o permitivitate ε diferită de cea a lichidului, se distribuie sub forma unor lanțuri în lungul liniilor de câmp, conducând astfel la apariția străpungerii. În aceste condiții rigiditatea dielectricilor lichizi depinde esențial de *tipul și de cantitatea de impurități conținute*, rămânând însă în majoritatea cazurilor de ordinal 20...25 MV/m, adică de aproape zece ori mai ridicată decât rigiditatea gazelor la presiune normală. Pentru exemplificare, în fig. 3.4 este prezentată variația rigidității dielectrice a uleiului mineral în funcție de conținutul de apă.

De asemenea, se constată că și temperatura constituie un factor important care influențează fenomenul de străpungere a lichidelor. De exemplu, în cazul uleiului mineral, creșterea temperaturii determină, mai întâi, o creștere foarte ușoară a rigidității dielectrice (datorită eliminării apei), după care urmează o reducere importantă a acesteia (datorită creșterii mobilității ionilor și mai ales a molionilor). În cazul lichidelor pure rigiditatea dielectrică se modifică doar pentru acele valori ale temperaturii

pentru care lichidul începe să se vaporizeze. Pentru temperaturi mai mari lichidele încep să se vaporizeze şi rigiditatea dielectrică scade (fig. 3.5)

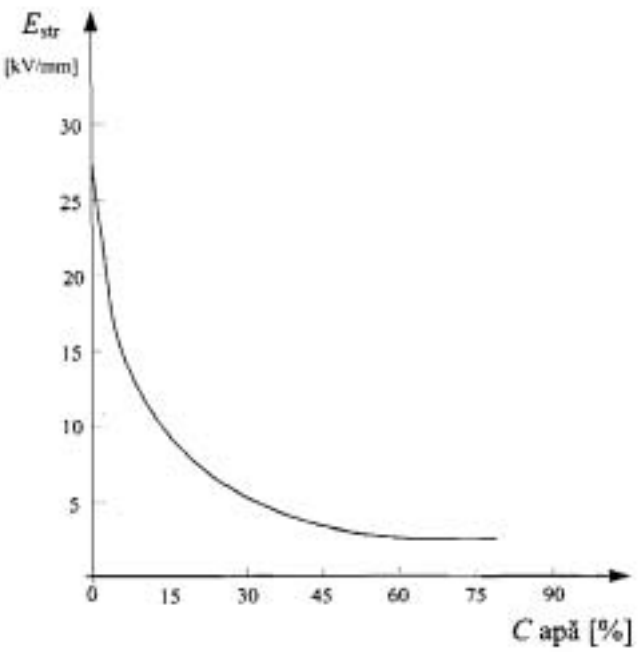


Fig. 3.4. Dependenţă rigidităţii dielectrice a uleiului mineral de conţinutul de apă [13].

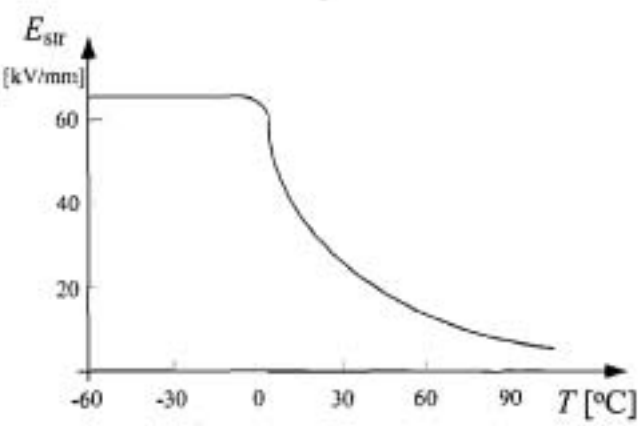


Fig. 3.5. Variaţia rigidităţii dielectrice a uleiului mineral în funcţie de temperatură [13].

Natura electrozilor şi distanţa dintre ei influenţează, de asemenea, valoarea rigiditatii dielectrice. În majoritatea cazurilor, se constată că valoarea rigidităţii dielectrice determinate cu ajutorul unui sistem de electrozi plan - plan este mai mare decât cea obţinută cu electrozi sferă – plan (fig. 3.6). De asemenea, s-a arătat că dacă aria comună a celor doi electrozi creşte, rigiditatea dielectrică scade. Studiile experimentale efectuate până în prezent arată că rigiditatea dielectrică variază invers proporţional cu distanţa dintre electrozi (fig. 3.6). Mai mult, în cazul lichidelor purificate, se constată că influenţa distanţei dintre electrozi se reduce foarte mult. Pornind de la aceste rezultate experimentale, se poate afirma că valoarea rigidităţii dielectrice depinde de volumul de lichid aflat între electrozi, adică de probabilitatea de existenţă a unui punct „slab" în interiorul lichidului.

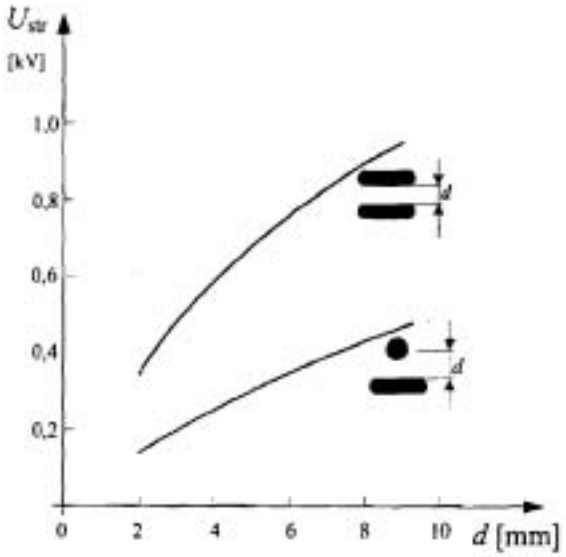


Fig. 3.6. Dependenţa tensiunii de străpungere de distanţa şi forma electrozilor [3].

Pentru câmpuri de frecvenţă ridicată, în special în cazul lichidelor polare, pierderile dielectrice conduc la o încălzire a lichidului ceea ce favorizează, de asemenea, străpungerea datorită creşterii numărului de purtători liberi. Rigiditatea dielectrică a lichidelor scade deci odată cu

creşterea frecvenţei tensiunii aplicate.

Neuniformitatea câmpului electric micşorează valoarea rigidităţii dielectrice. În câmpuri electrice puternic neuniforme (generate de muchiile nerotunjite, bavuri, etc.), în lichidele electroizolante se pot produce descărcări electrice nedisruptive asemenea descărcărilor corona în aer. Din acest motive iau naştere produse de descompunere a lichidului care se răspândesc în întreg volumul. Din acest motiv, în sistemele de izolaţie care conţin lichide, astfel de descărcări electrice nu sunt permise.

Datele experimentale arată că viteza de creştere a tensiunii electrice aplicate electrozilor influenţează fenomenul de străpungere: cu cât panta de creştere a tensiunii este mai mică cu atât abaterea valorilor tensiunii de străpungere este mai mare. Experimental se observă că valorile rigidităţii dielectrice se modifică dacă se trece de la tensiunea continuă la cea alternativă şi, de asemenea, se modifică cu duratele de aplicare a tensiunii. Pentru impulsurile a căror durată scade, rigiditatea dielectrică creşte rapid, începând cu o valoare critică a duratei numită durată de întârziere la străpungere.

Un alt factor care influenţează fenomenul de străpungere a lichidelor electroizolante este presiunea. Creşterea presiunii la care se găseşte un lichid electroizolant determină o reducere a volumului bulelor de gaz existente în lichid, bule în care se dezvoltă descărcări electrice parţiale, ceea ce în final conduce la creşterea rigidităţii dielectrice.

Aşa cum a fost arătat şi în cazul gazelor, şi lichidele electroizolante au proprietatea de a-şi regenera proprietăţile dielectrice. Trebuie însă subliniat că fenomenul de străpungere determină impurificarea lichidului cu produsele rezultate în urma străpungerii, ceea ce poate afecta valoarea rigidităţii dielectrice a lichidului. Totuşi, numai în situaţii cu totul speciale străpungerea unui lichid determină apariţia unor scurtcircuite permanente.

3.3.1. Teorii ale străpungerii lichidelor

Aşa cum a fost amintit mai sus, străpungerea lichidelor electroizolante poate să constituie un fenomen reversibil, în sensul în care, după încetarea acţiunii câmpului electric, proprietăţile dielectrice ale lichidului se

restabilesc. Există însă și situații în care apare o străpungere totală, fenomen după care dielectricul lichid își pierde proprietățile sale izolante definitiv.

Teoriile elaborate până în prezent, referitoare la străpungerea lichidelor se împart în trei categorii:

- teorii bazate pe ciocnirile și ionizările moleculelor lichidelor;
- teorii bazate pe existența unor bule de gaz sau a unor zone de densitate redusă în care se produc străpungeri locale;
- teorii bazate pe stabilirea unor căi conductoare (lanțuri de particule) între electrozi.

3.3.1.1. Teorii bazate pe ionizarea moleculelor

Teoriile electronice reprezintă, de fapt, extinderi ale teoriilor de străpungere a gazelor (*Townsend*) - § 3.2. La baza acestor teorii se află ipoteza potrivit căreia electronii prezenți în lichide sunt puternic accelerați de câmpul electric și produc ionizarea prin ciocnirea moleculelor de lichid. Cum în cazul lichidelor moleculele sunt mai apropiate decât la gaze, drumul liber mijlociu pentru electroni este mai mic și ca urmare, rigiditatea dielectrică E_{str} este mai mare decât la gaze (pentru ca electronii să fie suficient de mult accelerați pe parcursul, este necesar ca E_{str} sa fie mai mare).

În general, se consideră că principala sursă de electroni liberi aflați în lichidele electroizolante supuse acțiunii câmpului electric este reprezentată de emisia de electroni la catod (emisie termoelectronică influențată de câmpul electric). Totuși se poate arăta că emisia de electroni la catod nu este suficientă pentru producerea unei străpungeri. Rezultă că în lichidele electroizolante, în anumite condiții se produce o multiplicare a numărului de electroni, ceea ce conduce la apariția unor avalanșe de electroni [25,2].

Condiția de inițiere a unei avalanșe într-un lichid este dată de relația:

$$qEl_{med} > h\upsilon , \tag{3.10}$$

în care q reprezintă sarcina purtătorului (electron sau ion) care poate ioniza o moleculă de lichid, E intensitatea câmpului electric, $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js este constanta lui *Planck*, υ frecvența de oscilație a legăturilor dintre atomii

moleculei şi $h\upsilon$ energia electronului pierdută prin ciocnirea sa cu o moleculă a lichidului.

Intensitatea curentului electric ce străbate lichidul are aceeaşi expresie cu cea stabilită în cazul gazelor:

$$i = i_0 \exp(\alpha d), \tag{3.11}$$

în care α reprezintă coeficientul de ionizare care depinde de natura lichidului şi de intensitatea câmpului electric E iar d este distanţa dintre electrozi.

În lichidele ultra-pure mobilitatea electronilor este suficient de mare pentru a se putea forma o avalanşă de electroni. În cazul lichidelor în care electronii au mobilităţi mai reduse, datorită numeroaselor ciocniri cu moleculele de lichid, aceştia nu pot acumula suficientă energie pentru a determina ionizarea prin ciocniri a moleculelor. Prin urmare, rezultă că avalanşele de electroni se pot forma numai în lichidele în care mobilitatea electronilor are valori ridicate.

Se constată că în lichidele în care electronii au mobilitate redusă, injecţia de sarcină la catod poate determina apariţia unei zone de densitate redusă în care se dezvoltă avalanşe cu formarea unor bule de gaz. În funcţie de natura lichidului şi de forma şi durata tensiunii aplicate, aceste bule urmează sau preced fenomenul de străpungere propriu-zis.

În acord cu teoria lui *Townsend* pentru gaze, în cazul câmpurilor electrice intense apar avalanşe de electroni (fenomenul de multiplicare electronică), atingându-se un regim de descărcare autonomă care conduce, în final, la străpungerea fluidului. În cazul lichidelor electroizolante, mecanismul de producere a avalanşei de electroni este acelaşi: electronul germene accelerat de câmpul electric, rămâne în urma fiecărei ciocniri cu câte un rest de energie (nu cedează, prin ciocniri cu moleculele lichidului, întreaga lui energie); după un număr de ciocniri, în care resturile de energie se adună, acesta poate acumula energia necesară ionizării unei molecule (extragerii unui electron) printr-o *ciocnire ionizantă*. Cei doi electroni accelerați de câmpul electric, produc prin ionizari alţi electroni, astfel că după n astfel de procese rezultă 2^n electroni. Prin urmare, apare o avalanşă de electroni care, în cele din urmă, determină apariţia descărcării electrice.

În teoria străpungerii pur electrice, se consideră că, în procesul de strapungere, sunt determinanți electronii emiși de electrozi sub acțiunea câmpului electric.

3.3.1.2. Străpungerea termică

Se constată că, în anumite situații, se poate vorbi despre străpungerea termică a lichidelor electroizolante. Teoriile dezvoltate în acest sens consideră că temperatura lichidelor poate să crească datorită pierderilor dielectrice și prin conducție. Din acest motiv, în lichid iau naștere bule de vapori care, sub acțiunea câmpului electric se alungesc în lungul liniilor de câmp putând forma punți gazoase între electrozi. Cum rigiditatea dielectrică a gazelor este sensibil mai mică decât cea a lichidelor, în aceste canale pot să apară descărcări electrice, ceea ce ,în final, conduce la străpungerea lichidului.

În acest sens *Watson* și *Sharbaugh* [25] au propus un mecanism termic de străpungere a lichidelor, bazat pe existența curentului stabilit între electrozi care apar în cazul câmpurilor electrice intense (apropiate câmpurilor de străpungere). Astfel, au fost estimate valorile densității curentului $1.10 A/cm^2$ și (la nivelul asperităților electrozilor, unde câmpul electric este aproximativ de 5 până la 10 ori mai intens) în cazul hexanului, căldura produsă de acești curenți într-o microsecundă este de ordinul a câtorva zeci de cal/g, adică, comparabilă cu căldura de vaporizare a hexanului (100 cal/g). Densitățile locale mari ale curentului electric produc o pierdere relative mare de energie, respective un efect caloric important, care poate determina apariția unor bule de gaz într-un timp foarte scurt. După formarea bulelor, urmează imediat străpungerea, deoarece, așa cum s-a amintit mai sus, rigiditatea dielectrică a vaporilor de lichid este redusă.

3.3.1.3. Teoria bulelor

Studii experimentale efectuate în domeniu au arătat că rigiditatea dielectrică a unor lichide cum sunt hexanul, heptanul, benzenul etc. depinde

de presiunea hidrostatică. De exemplu, în cazul n-hexanului, rigiditatea dielectrică poate creşte cu 30% dacă presiunea creşte de la 0 la 25 bari.

În anul 1970 *Kao* [13] elaborează o teorie conform căreia străpungerea unui lichid se produce datorita bulelor care i-au naştere în interiorul lichidului din mai multe cauze: existenţa pungilor de gaze în vecinătatea electrozilor, repulsia electrostatică a sarcinilor spaţiale care poate fi superioară tensiunii superficiale a lichidului, disocierea moleculelor lichidului sub acţiunea câmpului electric, etc.

Energia înmagazinată într-un lichid care conţine o cavitate de volum V se poate exprima cu ajutorul următoarei relaţii [13]:

$$W = \frac{1}{8\pi}\int_{V}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E_2 E_0 dv\,, \tag{3.12}$$

unde E_0 reprezintă intensitatea câmpului electric aplicat, E_2 - intensitatea câmpului electric în interiorul bulei, ε_1 - permitivitatea lichidului şi ε_2 permitivitatea gazului din interiorul bulei. Se poate arăta că energia W scade dacă bula sferică iniţială ia forma unui elipsoid cu axa mare orientate după direcţia câmpului electric. Bula se alungeşte după direcţia câmpului până la producerea unei străpungeri electrice, căderea de potenţial pe bulă corespunzând valorii minime a tensiunii din curba lui *Paschen* (corespunzătoare gazului din bula considerată). Această teorie nu precizează însă modul de formare a bulei iniţiale. Mai mult, este foarte puţin probabil ca volumul bulei să rămână constant.

Formarea bulelor de gaz a fost fotografiată în cazul hexaclorfenilului, constatându-se că bulele se alungesc în direcţia câmpului, până la apariţia străpungerii. Dimensiunile acestor bule au fost măsurate în hexan de către *Smith* şi *Calderwood*, obţinându-se valori ale razelor de aproximativ 1 μm [2]

3.3.1.4. Teoria particulelor

Prezenţa particulelor izolante sau conductoare în lichide determină o reducere a rigidităţii dielectrice. Astfel, în particulele izolante (fibre, coloizi

etc) câmpul electric induce un moment electric şi, prin urmare, sub acţiunea forţelor de natură electrică acestea se deplasează spre zonele cu câmp mai intens, respectiv în spaţiul dintre electrozi. Pentru o particulă sferică, de rază r şi permitivitate ε_2, aflată în suspensie într-un lichid de permitivitate ε_1, forţa F care determină mişcarea sa are expresia [2]:

$$F = 2\pi r^3 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \text{grad} E^2 . \qquad (3.13)$$

Pe de altă parte, impurităţile metalice şi produsele rezultate prin degradarea uleiului formează punţi de legătură între electrozi, provocând apariţia unei străpungeri sau a unei descărcări de dimensiuni foarte reduse (microstrăpungere).

Formarea acestor punţi de particule determină întotdeauna o reducere a rigidităţii dielectrice, deoarece câmpurile la care se produc străpungerile acestor zone sunt mai reduse decât cele corespunzătoare străpungerii lichidului. Pe de altă parte, la 90°C, particulele metalice prezintă o tendinţa de coagulare, iar particulele de celuloza îşi pierd umiditatea, deci influenţa lor asupra rigidităţii dielectrice se reduce. Dacă lichidul se află în mişcare, atunci rigiditatea dielectrică creşte, deoarece "punţile de particule" nu se pot forma. Acest model de străpungere nu se aplică pentru lichidele ultra-pure.

Străpungerea este precedată de formarea unor zone de densitate mai redusă decât densitatea lichidului. Înainte de producerea străpungerii se constată apariţia unor structuri arborescente, numite *strimeri* [25].

3.4. Străpungerea sistemelor de izolaţie solide

Ca şi în cazul gazelor şi lichidelor, din punct de vedere macroscopic, fenomenul de străpungere a izolaţiilor solide se manifestă printr-o creştere bruscă a intensităţii curentului electric care tranzitează materialul electroizolant. Şi în acest caz rigiditatea dielectrică E_{str} este definită ca fiind valoarea minimă a intensităţii câmpului electric la care se produce străpungerea. Valoarea tensiunii aplicate corespunzătoare lui E_{str} se numeşte tensiune de străpungere U_{str}.

Determinarea experimentală a rigidităţii dielectrice a materialelor electroizolante solide poate fi realizată în diverse feluri, dar rezultatele obţinute nu se pot compara, ele fiind strict valabile pentru condiţiile efectuării măsurătorilor. În principiu, rigiditatea dielectrică este determinată ca fiind intensitatea câmpului electric între două plăci de dimensiuni infinite. În realitate însă, electrozii utilizaţi au dimensiuni finite ceea ce face ca la capetele acestora câmpul electric să fie mai intens decât la mijlocul plăcilor. Electrozii utilizaţi în practică au forme standardizate astfel încât să se evite prezenţa descărcărilor parţiale interne sau pe suprafaţă. În fig. 3.7 sunt exemplificate câteva tipuri de electrozi utilizaţi în practică pentru determinarea rigidităţii dielectrice [26,13].

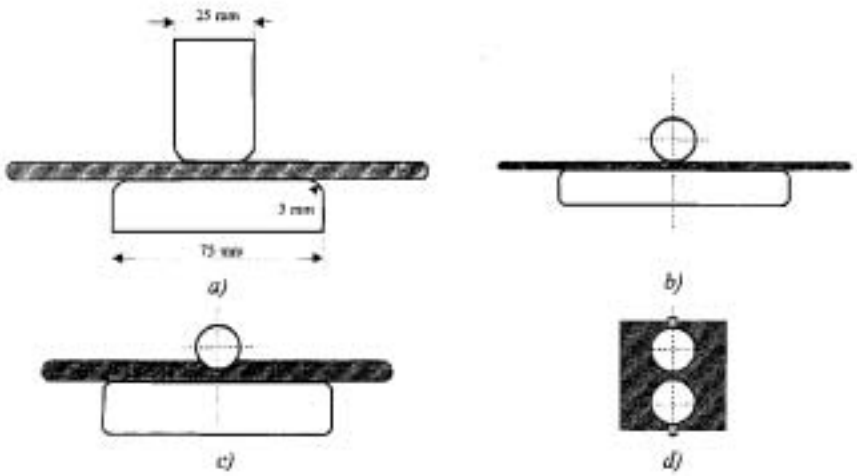


Fig. 3.7. Sisteme de electrozi standardizaţi utilizaţi pentru determinarea experimentală a rigidităţii dielectrice.

Modelele dezvoltate pentru caracterizarea fenomenelor de străpungere a izolaţiilor solide vizează, în general, anumite grupe de materiale şi sunt bazate pe rezultate experimentale. Una dintre concluziile de bază rezultate în urma studiilor efectuate arată că rigiditatea dielectrică a materialelor solide depinde de structura fizico-chimică a corpurilor, dar şi de defectele prezente pe suprafaţa sau în volumul acestora. Ţinând cont de mecanismul principal care determină producerea fenomenului de străpungere a unei izolaţii solide, străpungerile sunt clasificate astfel:

- străpungerea termică;
- străpungerea electronică;
- străpungerea electromecanică;

3.4.1. Străpungerea termică

Străpungerea termică a unui material electroizolant este datorată, în exclusivitate creşterii temperaturii materialului, ca urmare a căldurii acumulate în volumul său datorită producerii pierderilor dielectrice prin conducţie şi/sau prin polarizare.

Pierderile prin conducţie în unitatea de volum depind de conductivitatea σ şi de intensitatea câmpului electric E şi se exprimă prin relaţia $p_C = \sigma E^2$. Pierderile specifice prin polarizare produse de un câmp electric de pulsaţie ω într-un dielectric de permitivitate ε au expresia $p_p = \omega \varepsilon E^2 \tan \delta_p$. O parte din căldura rezultată în urma producerii pierderilor se transmite, prin conducţie termică către exterior. Astfel, ecuaţia de bilanţ termic se poate scrie [2]:

$$\sigma E^2 + \omega \varepsilon E^2 \tan \delta_p = C_v \frac{dT}{dt} - \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) \tag{3.14}$$

în care $C_v \frac{dT}{dt}$ reprezintă căldura stocată în unitatea de volum în corp (C_v este căldura specifică la volum constant) şi $\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T)$ este căldura transmisă prin conducţie termică, în care λ este conductivitatea termică a materialului.

Rezolvarea ecuaţiei (3.14) conduce la aflarea unei valori critice a intensităţii câmpului electric E_c, pentru care temperatura în zona cea mai fierbinte a izolaţiei se apropie de o valoare critică T_c, la care legăturile chimice între atomii care constituie corpul încep să se desfacă. În general sunt tratate două cazuri: regimul staţionar în care căldura disipată local este transferată integral întregului corp ($d / dt = 0$) şi cazul în care sunt aplicate impulsuri scurte de tensiune, ceea ce, în final, corespunde situaţiei în care

întreaga cantitate de căldură este acumulată în izolator. În cazul regimului staţionar, prin rezolvarea ecuaţiei (3.14) în care derivata temperaturii în raport cu timpul este considerată nulă, rezultă că panta de creştere a tensiunii depinde de intensitatea câmpului electric aplicat. Astfel, pentru valori reduse ale lui E (sensibil mai mici decât valoarea critică E_c), temperatura creşte lent către o valoarea inferioară temperaturii T_c (curba 1 din fig. 3.8). Pentru valori ale lui E foarte apropiate de E_c se observă (curba 2 – fig. 3.8) că panta de creştere a temperaturii este mai mare şi, după un interval de timp Δt aceasta atinge valoarea T_c. Pentru $E > E_c$ se constată că temperatura corpului depăşeşte rapid valoarea critică T_c, la care are loc desfacerea legăturilor interatomice şi distrugerea locală a materialului.

Pe baza celor prezentate mai sus, în practică, în cazul câmpurilor electrice şi termice uniforme, pentru calculul tensiunii de străpungere corespunzătoare străpungerii termice este folosită următoare relaţie [2]:

$$U_{str} = C_F \cdot \left(\frac{\lambda}{\sigma_0 \cdot \alpha_T} \right)^{1/2}, \qquad (3.15)$$

în care C_F reprezintă o constantă a cărei valoare depinde de factorii care determină fluxul caloric, σ_0 reprezintă conductivitatea electrică a materialului la temperatura ambiantă şi α_T este coeficientul de variaţie cu temperatura a conductivităţii electrice.

Aşa cum se constată şi pe cale experimentală, relaţia (3.15) arată că valoarea tensiunii de străpungere termică creşte atunci când conductivitatea termică a izolaţiei λ este mare şi conductivitatea electrică şi coeficientul de variaţiei a acesteia cu temperatura sunt reduse.

Într-un sistem de izolaţie real, deosebirea faţă de cele arătate mai sus constă în neuniformitatea repartiţiei densităţilor de curent (pierderilor) şi a fluxului caloric. Astfel, în zonele cu densităţi mari de curent, încălzirea izolaţiei este mai accentuată ceea ce determină creşterea locală a conductivităţii electrice şi, prin urmare, a densităţii de curent. În final, temperatura locală creşte atât de mult încât depăşeşte T_c şi materialul se străpunge.

3.4.2. Străpungerea electronică

Străpungerea electronică este datorată în exclusivitate creşterii însemnate a concentraţiei şi/sau a energiei electronilor liberi dintr-un material electroizolant sub acţiunea câmpului electric. Acest mecanism de străpungere este caracteristic izolaţiilor cu pierderi dielectrice reduse (izolaţiile a căror temperatură nu se modifică ca urmare a acţiunii câmpului electric). Străpungerea electronică apare întotdeauna atunci când solicitările electrice au intensităţi mari şi durate foarte scurte.

În general, în teoriile dezvoltate până în prezent se consideră că străpungerea electronică este de două tipuri: străpungere electronică (sau electrică) intrinsecă şi străpungere electronică prin avalanşă.

3.4.2.1. Străpungerea intrinsecă

Acest model de străpungere are la bază schimbul de energie care se face între electronii liberi dintr-un corp accelerați de câmpul electric şi particulele care constituie acel corp. În general, este acceptată ipoteza potrivit căreia, un electron accelerat de câmpul electric cedează prin ciocniri întreaga sa energie particulelor unui corp dacă viteza sa rămâne inferioară unei valori maxime. Prin urmare, ţinând cont de faptul că viteza unui astfel de electron creşte odată cu intensitatea câmpului electric, rezultă că există o valoare critică E_C începând de la care energia absorbită de electroni în unitatea de timp este mai mare decât cea cedată corpului. Cu alte cuvinte, pentru $E > E_C$, în urma fiecărei ciocniri electronii rămân cu câte un rest de energie, ceea ce face ca la un moment dat energia acestora să fie foarte importantă (motiv pentru care aceşti electroni mai sunt numiţi şi *electroni de energii înalte*).

Ca şi în cazul străpungerii termice, şi în acest caz poate fi scrisă o ecuaţie de echilibru a energiilor care, aşa cum se va explica ulterior, poate fi satisfăcută numai pentru valori ale intensităţii câmpului electric inferioare valorii critice E_C.

Energia medie acumulată în unitatea de timp de un electron p_a are următoarea expresie:

$$p_a = \frac{JE}{n}, \tag{3.16}$$

în care J reprezintă densitatea curentului electric ce străbate dielectricul considerat şi n este concentraţia volumică a electronilor. Trebuie remarcat că densitatea de curent J şi concentraţia de electroni n depinde de temperatură dar şi de un parametru ϖ care ţine cont de caracteristicile benzilor de energie ale electronilor, de concentraţia şi adâncimea capcanelor, etc.

Energia pierdută în unitatea de timp de un electron p_t depinde de temperatura la care se găseşte corpul şi de factorul ϖ. Prin urmare, la echilibru poate fi scrisă următoarea relaţie:

$$p_a(E,T,\varpi) = p_t(T,\varpi). \tag{3.17}$$

Având ca punct de plecare aceste observaţii, au fost dezvoltate mai multe teorii referitoare la străpungerea electronică intrinsecă.

În *modelul unui singur electron* elaborat de *von Hippel*, mărimile p_a şi p_t sunt exprimate considerând că în banda de conducţie a dielectricului se găseşte un singur electron care poate pierde sau câştiga energie în urma ciocnirii cu reţeaua [2]. Se presupune că ciocnirile electronului determină emisia şi absorbţia unor cuante de energie hν (ν reprezentând frecvenţa de vibraţie a reţelei) şi se ţine cont de probabilităţile de emisie şi de absorbţie a unei astfel de cuante. *Von Hippel* a arătat că există o valoare E_{vH} a intensităţii câmpului electric la care ecuaţia $p_a = p_t$ are o singură soluţie care corespunde valorii maxime a lui E, pentru care creşterea energiei electronului poate fi compensată prin cedarea (prin ciocniri), de către acesta, reţelei, a unei energii de aceeaşi valoare. Această valoare a intensităţii câmpului electric reprezintă de fapt criteriul energiei reduse pentru străpungerea intrinsecă, adică valoarea minimă a intensităţii câmpului electric la care energia oricărui electron liber continuă să crească până la producerea străpungerii.

Un alt model mai complex referitor la străpungerea intrinsecă a fost dezvoltat de *Frohlich* [13]. Acesta consideră că fenomenul de străpungere poate să aibă loc şi în câmpuri de intensitate mai redusă decât E_{vH} dacă electronii care au energia suficient de mare acumulează energie cu o viteză

mai mare decât cea cu care cedează energie rețelei. În modelul lui *Frohlich* câmpul electric de străpungere (criteriul de străpungere) se definește ca fiind valoarea pentru care energia unui electron corespunde energiei de ionizare a unui atom al corpului (la această valoare a intensității câmpului electric, notată cu E_{Fr} , se produce o ionizare semnificativă a atomilor corpului). Modelul lui *Frholich* a fost verificat experimental pe mai mulți polimeri precum polietilena, acetat de polivinil, PCV, etc.

3.4.2.2. Străpungerea prin avalanșă

Străpungerea electronică prin avalanșă are la bază ipoteza conform căreia într-un corp electroizolant supus acțiunii unui câmp electric foarte intens, pornind de la un *electron germene* (un electron de energie înaltă), în urma ciocnirilor ionizante, numărul de electroni liberi crește exponențial conducând la formarea unei avalanșe electronice și, în final, la străpungere. Avalanșa formată în câmpuri electrice intense, pe de o parte, absoarbe energie de la câmpul electric și, pe de altă parte, determină un transfer local de energie către rețea conducând astfel la distrugerea acesteia.

Modelele dezvoltate în cadrul acestei teorii de străpungere au permis evaluarea *numărului critic de generații de ciocniri ionizante* care conduce la formarea unei avalanșe de electroni suficient de mare pentru a produce distrugerea locală a rețelei. Unul dintre cele mai simple modele de calcul al numărului critic de generații de ciocniri ionizante, elaborat de *Seitz*, consideră, la început, un electron care se deplasează sub acțiunea câmpului electric de la catod către anod. În mișcarea sa, electronul suferă atât ciocniri ionizante cu particulele corpului cât și un fenomen de difuzie în planul perpendicular pe direcția de mișcare datorită agitației termice. În mod cu totul asemănător, electronii secundari rezultați în urma ciocnirilor ionizante, sunt, la rândul lor afectați de fenomenul de difuzie (ceea ce înseamnă de fapt o deplasare laterală) astfel încât, avalanșa de electroni tinde să ia forma unui con cu vârful în imediata vecinătate a catodului. Pentru simplificare se poate considera că deplasarea laterală a electrodului inițial datorată difuziei l_{dif} este aproximativ egală cu raza avalanșei (în planul perpendicular pe direcția de deplasare) în imediata vecinătate a anodului.

Presupunând că i generații de ciocniri ionizante au fost necesare

pentru producerea fenomenului de străpungere, la o distanţă foarte mică de suprafaţa anodului rezultă un număr de 2^i electroni (ceea ce înseamnă, de fapt, că generaţia i este cea care determină distrugerea locală a reţelei şi străpungerea corpului). Conform celor presupuse anterior rezultă că distanţa medie necesară producerii unei noi generaţii de electroni de către generaţia precedentă este d_{mg}:

$$d_{mg} = \frac{d}{i+1}, \tag{3.18}$$

în care d reprezintă grosimea izolatorului (distanţa dintre catod şi anod). Rezultă că a i-a generaţie de electroni are o energie suficient de mare pentru a determina străpungerea dielectricului şi se găseşte într-un cilindru de diametru l_{dif} şi lungime d_{mg}.

Ţinând cont că energia unui electron al avalanşei accelerat în câmp electric este $w_e = q_0 E d_{mg}$, energia caracteristică întregii avalanşe i este:

$$w_{av_i} = 2^i q_0 E d_{mg}. \tag{3.19}$$

Deoarece timpul caracteristic de producere a unei generaţii de electroni este foarte scurt se poate considera că nu există un flux important de căldură transmis prin suprafaţa laterală a cilindrului în interiorul căruia este conţinută ultima generaţie de electroni. Prin urmare, toată energia electronilor care compun avalanşa poată fi transmisă reţelei, conducând astfel la distrugerea acesteia.

Estimarea energiei necesare distrugerii unei anumite părţi a reţelei unui corp poate fi făcută pornind de la cantitatea de energie care trebuie furnizată unui atom w_{at} pentru ca acesta să părăsească reţeaua (în funcţie de natura corpului, w_{at} poate varia între 1 eV şi 10 eV. Notând cu N_{at} concentraţia de atomi, energia totală corespunzătoare străpungerii în volumul ocupat de ultima generaţie a avalanşei este:

$$w_{str} = w_{at} N_{at} \pi l_{dif}^{\,2} d_{mg}. \tag{3.20}$$

Prin urmare, criteriul de străpungere prin avalanşă presupune existenţa unui câmp electric critic de intensitate E_{anal}, pentru care este satisfăcută relaţia: $w_{av_i} \geq w_{str}$:

$$2^i q_0 E d_{mg} \geq w_{ai} N_{ai} \pi l_{dif}^2 d_{mg}, \tag{3.21}$$

de unde, prin logaritmare, rezultă la limită:

$$i = \log_2 \left(\frac{w_{ai} N_{ai} \pi l_{dif}^2}{q_0 E_{aval}} \right). \tag{3.22}$$

Valoarea lungimii de difuzie l_{dif} poate fi estimată cu ajutorul expresiei $l_{dif} = (Dt_f)^{1/2}$, în care D reprezintă coeficientul de difuzie a electronilor și t_f durata de formare a avalanșei, egal cu raportul dintre d și viteza de drift a electronilor v_E ($v_E = \mu E_{aval}$)

Pornind de la probabilitatea de ciocnire dintre un electron liber și rețea, se poate determina expresia intensității critice a câmpului electric. De asemenea, este introdusă noțiunea de *durată de întârziere statistică a avalanșei* t_s, care se definește ca fiind intervalul de timp scurs între momentul în care avalanșa a fost inițiată și momentul în care se produce străpungerea. Relațiile matematice obținute arată că t_f este foarte mult influențat de grosimea eșantionului.

3.4.3. Străpungerea electromecanică

Acest mecanism de străpungere este atribuit forțelor de compresie care acționează asupra unui dielectric aflat între doi electrozi între care există o diferență de potențial U. Aceste forțe de compresiune sunt datorate fenomenului de electrostricțiune (atracției electrostatice dintre cei doi electrozi). Atunci când aceste forțe depășesc o valoarea critică care nu poate fi preluată de elasticitatea materialului, se produce fenomenul de străpungere. Valoarea tensiunii corespunzătoare străpungerii electromecanice rezultă prin egalarea forței electrostatice cu cea de deformare elastică corespunzătoare stării de echilibru dinaintea străpungerii eșantionului. În cazul unui film electroizolant de grosime inițială g_0 plasat între doi electrozi plani, se poate scrie relația [2]:

$$\frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{U}{g}\right)^2 = Y\ln\left(\frac{g_0}{g}\right), \tag{3.23}$$

în care ε este permitivitatea absolută a dielectricului, $g(U)$ grosimea redusă a filmului electroizolant corespunzătoare tensiunii aplicate U şi Y este modulul de elasticitate al lui *Young* corespunzător materialului considerat. Se obţine:

$$U = g\left[2\frac{Y}{\varepsilon}\ln\left(\frac{g_0}{g}\right)\right]^{1/2}. \tag{3.24}$$

Studiile efectuate au arătat că există o valoare critică a tensiunii aplicate pentru care grosimea dielectricului g tinde către zero. Aceasta se obţine punând condiţia $d[g(U)]/dU \to \infty$, ceea ce este echivalent cu $dU/d[g(U)] = 0$. Considerând că Y este constant în timp şi nu depinde de intensitatea solicitării, derivând relaţia (3.24) şi apoi înlocuindu-l pe g rezultă expresia tensiunii de străpungere electromecanice:

$$U_{str,elm} = U_{elm} = g_0\left(\frac{Y}{e\varepsilon}\right)^{1/2}, \tag{3.25}$$

de unde se obţine expresia rigidităţii dielectrice corespunzătoare străpungerii electromecanice:

$$E_{str,elm} = E_{elm} = \left(\frac{Y}{e\varepsilon}\right)^{1/2}, \tag{3.26}$$

care, aşa cum se poate observa, depinde numai de modulul de elasticitate şi de permitivitatea materialului.

Explicarea fenomenului de străpungere electromecanică se poate face considerând că în filmul electroizolant supus acţiunii câmpului electric au loc mai multe fenomene. Astfel, în anumite zone în care eforturile mecanice sunt foarte intense, poate să apară o anumită instabilitate care conduce la o subţiere localizată a eşantionului şi care antrenează creşterea intensităţii câmpului electric şi, în final, străpungerea. De asemenea, anumite studii au arătat că în aceste zone foarte reduse intensitatea mare a câmpului electric produce deformarea şi chiar curgerea materialului. Alte

teorii dezvoltate consideră că străpungerea electromecanică se poate datora unei electrofracturări a materialului, care constă în apariția și propagarea unei fisuri datorată acțiunii forțelor electrostatice.

În raport cu cele amintite mai sus trebuie remarcat că reducerea locală a grosimii unui material electroizolant datorită acțiunii forțelor electrostatice și, deci, creșterea locală a intensității câmpului electric poate iniția un alt mecanism de străpungere care să se manifeste înaintea străpungerii electromecanice. Străpungerea electromecanică apare mai cu seamă în cazul eșantioanelor subțiri (filmelor polimerice) în care micile deformații locale conduc la creșterea intensității câmpului electric. În cazul izolațiilor groase utilizate la majoritatea mașinilor și echipamentelor electrice, apariția străpungerilor electromecanice este foarte puțin probabilă.

3.4.4. Străpungerea în câmpuri electrice neuniforme

Există situații în care sistemele de izolație sunt supuse unor câmpuri electrice neuniforme. Acestea sunt datorate fie formei electrozilor (de exemplu un sistem de electrozi ac-plan) fie protuberanțelor electrozilor sau impurităților metalice existente la suprafața sau în volumul dielectricilor.

Spre deosebire de cele constatate în cazul izolațiilor gazoase sau lichide, în cazul sistemelor de izolație solide în zonele supuse unor câmpuri electrice foarte intense unde au loc străpungeri parțiale sau nedisruptive nu se regenerează, fapt ce are implicații foarte importante asupra fenomenelor succesive.

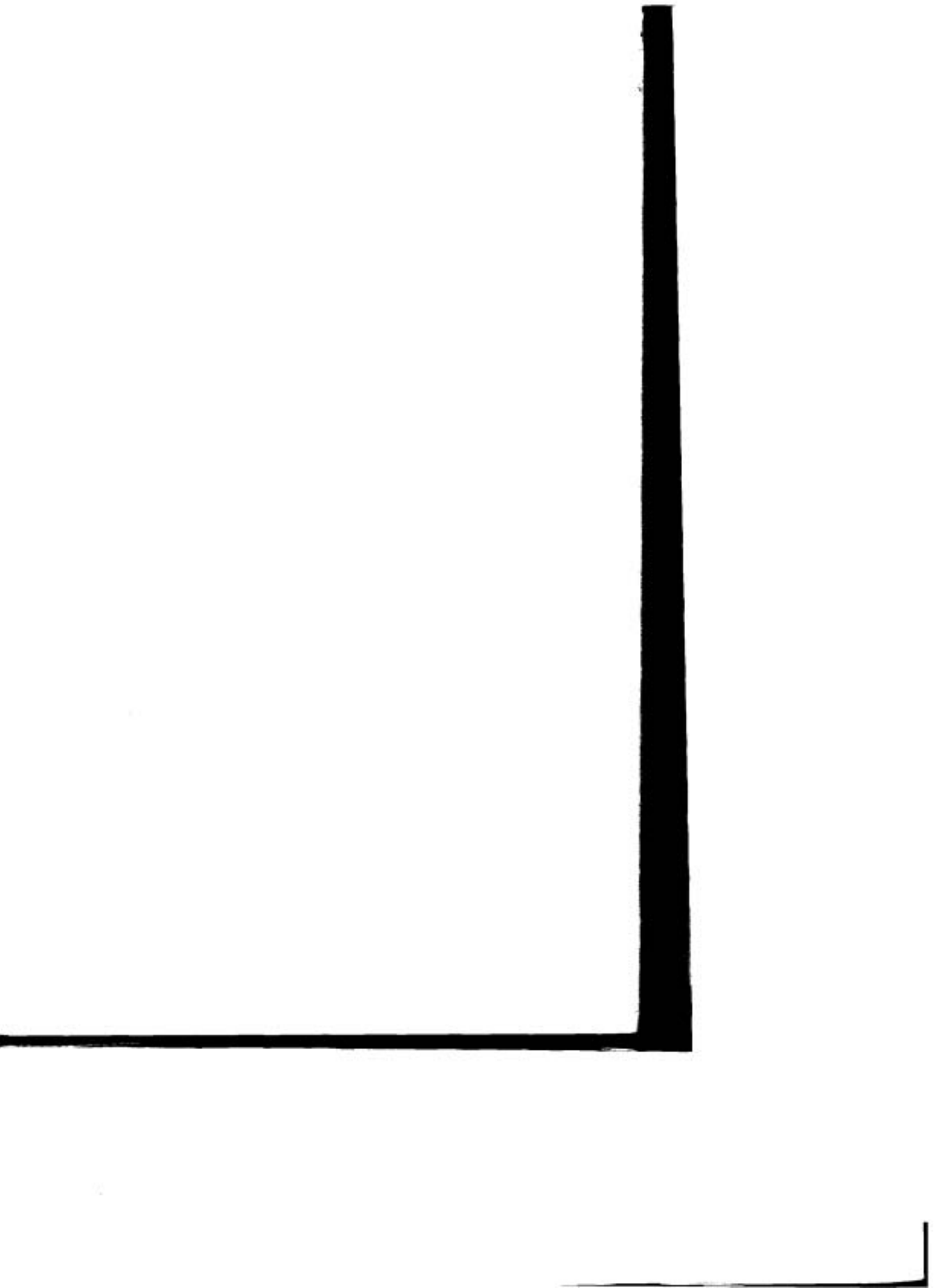
Dacă se consideră un sistem de electrozi ac-plan între care este fixat un material electroizolant solid, se constată că, la vârful acului, chiar în cazul aplicării unor diferențe de potențial scăzute, intensitatea câmpului poate depăși rigiditatea dielectrică a materialului. Prin urmare, regiunea aflată în imediata vecinătate a vârfului acului se va degrada și în timp se vor forma canale fine ce se propagă către electrodul opus. Așa cum se va descrie mai pe larg în capitolul următor, acest fenomen complex, cunoscut sub numele de *arborescențe electrice,* poate conduce în timp la străpungerea izolației.

3.4.5. Străpungerea izolaţiei stratificate

În sistemele de izolaţie stratificate se evidenţiază anumite aspecte particulare legate de fenomenul de străpungere. Astfel, în cazul izolaţiilor alcătuite din straturi groase, în materialele cu permitivitate mai mică câmpul electric este mai intens, iar în cele cu permitivitate mai mare câmpul electric este mai slab. În general acest aspect conduce la o valorificare inferioară a proprietăţilor materialelor electroizolante, utilizarea lor fiind impusă de alte necesităţi ca, de exemplu, proprietăţile lor mecanice [3].

Sistemele de izolaţie alcătuite din straturi subţiri se comportă, în general, ca materiale omogene ale căror caracteristici pot fi superioare caracteristicilor materialelor componente luate separat. În această categorie intră izolaţiile impregnate sau saturate (hârtia sau diferite textile impregnate sau saturate). În esenţă, şi în aceste cazuri apare problema repartiţiei neuniforme a solicitărilor electrice. Astfel, lichidul de impregnare, având permitivitatea mai mică este mai puternic solicitat. Practic, se constată însă că lichidele electroizolante în straturi subţiri au rigidităţi dielectrice foarte mari. Acest lucru este valabil şi în cazul straturilor multiple ceea ce poate explica faptul că, în general, izolaţiile stratificate din hârtie sau ţesături impregnate au o rigiditate foarte bună. Dacă condiţiile de cedare a căldurii sunt corespunzătoare (nu se produc acumulări de căldură care să conducă la fenomenul de străpungere termică) se constată că rigiditatea dielectrică a unei astfel de izolaţii nu scade decât foarte puţin cu grosimea izolaţiei.

S-a constatat că mecanismul de străpungere termică în izolaţiile stratificate se desfăşoară diferit faţă de cel din izolaţiile omogene. Rigiditatea izolaţiilor stratificate este cu atât mai mare cu cât straturile componente au grosimi mai mici. În anumite situaţii în care lichidul de impregnare nu pătrunde satisfăcător între straturi (în cazul sistemelor alcătuite din folii sintetice care nu permit pătrunderea lichidului), rigiditatea întregului ansamblu poate avea valori scăzute (în plus poate fi favorizată apariţia descărcărilor parţiale). Pentru evitarea acestor situaţii, în cazul sistemelor de izolaţie alcătuite din straturi polimerice, între două straturi consecutive sunt plasate medii absorbante care reţin lichidul de impregnare.



4. ÎMBĂTRÂNIREA SISTEMELOR DE IZOLAŢIE

Sistemele de izolaţie ale maşinilor şi echipamentelor electrice sunt supuse solicitărilor electrice, termice, mecanice şi de mediu amintite în primul capitol al lucrării. Datorită acestor solicitări, proprietăţile izolaţiei se schimbă şi, într-o perioadă de timp mai lungă, caracteristicile fizice ale acesteia, printre care şi cele electrice, se înrăutăţesc. Acest proces este denumit generic *îmbătrânirea izolaţiei* şi se referă la *degradarea* treptată a proprietăţilor izolante, fapt care este cel mai bine reflectat în modificarea caracteristicilor electrice ale sistemelor de izolaţie.

4.1. Fenomene fizico-chimice de îmbătrânire a izolaţiilor

Cauza îmbătrânirii izolaţiei constă în modificările fizico-chimice ireversibile care se produc în timp în materialele electroizolante care intră în componenţa sistemelor de izolaţie supuse solicitărilor.

Materialele electroizolante organice sunt mai sensibile la îmbătrânire deoarece ele sunt mai instabile din punct de vedere chimic. Contrar acestora, materialele anorganice (sticla, mica, ceramica, etc.) îmbătrânesc mult mai greu, durata lor de viaţă fiind cu cel puţin un ordin de mărime mai mare decât cea a materialelor organice.

Cele mai importante solicitări, care determină, în general, durata de viaţă a izolaţiilor, sunt cele termice. Aceasta se explică prin faptul că viteza de producere a reacţiilor chimice de degradare este direct proporţională cu temperatura. Astfel, cu cât temperatura izolaţiei este mai mare cu atât numărul de legături chimice care se desfac este mai mare şi lanţurile macromolecurare se fracturează.

În raport cu procesele de degradare termică, influenţa solicitărilor

electrice asupra îmbătrânirii izolaţiei este cu mult mai mică, dar sesizabilă la anumite materiale. Intensitatea câmpului electric influenţează în mod direct sau indirect îmbătrânirea izolaţiei (de exemplu efectul chimic şi mecanic al descărcărilor disruptive locale). Descărcările electrice nedisruptive conduc la formarea ozonului sau a altor elemente care pot declanşa reacţii chimice de degradare [3].

Un punct important care va fi tratat aparte în următorul subcapitol vizează unele fenomene care se produc în anumite condiţii în sistemele de izolaţie supuse acţiunii câmpului electric şi care au ca efect degradarea severă a acestora şi, uneori, chiar străpungerea. Aceste fenomene se referă la *descărcările parţiale* şi *arborescenţele electrochimice*. Deşi, în mod tradiţional, aceste fenomene sunt prezentate în unele lucrări ca reprezentând mecanisme de străpungere a sistemelor de izolaţie, considerăm că atât descărcările parţiale cât şi arborescenţele electrochimice determină, în primul rând, degradarea accelerată a izolaţiilor şi, numai ca o consecinţă a acestui proces, pot conduce la străpungerea acestora.

Influenţa solicitărilor mecanice asupra fenomenelor de îmbătrânire este dificil de cuantificat. Desigur că, în anumite cazuri, solicitările mecanice importante pot conduce la degradarea rapidă a sistemelor de izolaţie prin producerea de micro-fisuri sau striviri locale ale materialelor dielectrice solide. De asemenea, în anumite cazuri (emailuri, folii polimerice, etc.) se constată că tensiunile mecanice remanente, datorate în principal proceselor de fabricaţie, au un rol important în accelerarea fenomenului de îmbătrânire a izolaţiei.

Factorii externi contribuie şi ei la îmbătrânirea sistemelor de izolaţie. Deşi aici pot fi amintite mai multe aspecte legate de interacţiunea sistem de izolaţie - mediu, cele mai importante consecinţe se datorează interacţiunilor de natură chimică directe sau indirecte. Astfel, materialele electroizolante pot fi influenţate de factori chimici externi, proveniţi de la materialele adiacente sau de la alte produse rezultate prin descompunerea acestora, metalele cu care se află în contact, umezeală, poluanţi industriali gazoşi, radiaţii ultraviolete, etc.

Fenomenele chimice care cauzează îmbătrânirea izolaţiei sunt grupate în mai multe categorii. Printre acestea fenomenul de oxidare este

deosebit de important. Astfel, oxigenul din aer sau chiar ozonul pot să desfacă legăturile moleculare existente în materialele electroizolante organice. Acest lucru are o consecinţă importantă asupra proprietăţilor fizice ale materialelor. Reacţiile de oxidare pot conduce chiar şi la formarea unor substanţe volatile sau agresive din punct de vedere chimic, care alterează drastic proprietăţile dielectrice ale izolaţiilor sau, prin influenţa lor catalitică accelerează procesul de degradare.

Gradul de polimerizare a materialelor sintetice determină, de asemenea, proprietăţile izolaţiilor. În general, mărimile macromoleculelor ce compun materialele polimerice utilizate în sistemele de izolaţie sunt alese în aşa fel încât să fie asigurate cele mai importante proprietăţi dielectrice. În timpul exploatării sistemelor de izolaţie, fenomenul de polimerizare poate însă să continue (mai cu seamă datorită temperaturii), materialele devenind suprapolimerizate, fapt ce conduce la modificarea proprietăţilor mecanice şi, în principal, la creşterea fragilităţii (creşte rigiditatea mecanică) ceea ce favorizează producerea de micro-fisuri.

La temperaturi mai ridicate se poate produce şi depolimerizarea materialelor dielectrice, adică scăderea gradului de polimerizare prin descompunerea macromoleculelor. Uneori reacţiile de depolimerizare se produc în prezenţă oxigenului, alteori au loc în absenţa acestuia.

În sistemele de izolaţie poate să apară şi fenomenul de hidroliză. Pătrunderea apei în materialele organice conduce la modificarea structurii moleculare a acestora şi, prin urmare, la modificarea proprietăţilor dielectrice. În anumite cazuri (la materialele pe bază de celuloză) fenomenul de depolimerizare are un caracter de hidroliză.

La anumite categorii de materiale poate avea loc evaporarea unor substanţelor volatile. Este cazul substanţelor conţinute în masele plastice, răşini sintetice, etc. Acest fenomen conduce la contractarea şi fragilizarea materialului şi la o degradare corespunzătoare a proprietăţilor mecanice.

4.2. Îmbătrânirea izolațiilor sub acțiunea câmpului electric

Așa cum a fost semnalat mai sus, unele dintre cele mai nocive fenomene care se produc în sistemele de izolație ale echipamentelor electrice sunt *descărcările parțiale* și *arborescențele electrochimice*. Acesta este motivul principal pentru care în lucrarea de față este rezervat un spațiu mai amplu prezentării aspectelor de bază legate de producerea acestor două fenomene.

4.2.1. Descărcări parțiale în sistemele de izolație

4.2.1.1. Noțiuni generale

Descărcările parțiale (DP) se produc în cavitățile cu gaz existente în sistemele de izolație solide sau în bulele de gaz din lichidele electroizolante și constau în descărcări electrice locale și nedisruptive. Descărcările parțiale se manifestă prin impulsuri de curent în sistemul de izolație dar și în circuitul exterior care, deși sunt caracterizate de energii mici, conduc în timp la degradarea progresivă a proprietăților dielectrice ale izolațiilor.

Condiția primară de producere a DP se referă la existența cavităților cu gaz. Eliminarea completă a cavităților din izolațiile echipamentelor și mașinilor electrice este practic imposibilă. Vacuolele sau incluziunile gazoase iau naștere de regulă în izolațiile omogene, în stare plastică, în timpul prelucrărilor tehnologice (de exemplu, la turnarea rășinilor sintetice, la extrudarea maselor plastice etc.). În izolațiile polimerice cavitățile cu gaz se formează ca urmare a contracției neuniforme a materialului sau/și în cursul reacțiilor chimice de întărire care au loc după încheierea procesului tehnologic principal. În sistemele de izolație stratificate formarea vacuolelor este și mai probabilă și se datorează aerului rezidual dintre straturile de hârtie, de folii sau de alt material, care nu se elimină nici după operația de impregnare a izolației. De asemenea, cavitățile gazoase se pot forma și la impregnarea izolației stratificate cu rășini sintetice, dacă fenomenele chimice care au loc sunt însoțite de producerea unor gaze și/sau vapori de

apă. Locul tipic de formare a incluziunilor gazoase în izolaţiile stratificate se află, în general, între două spire înfăşurate, unde masa de impregnare nu a pătruns. Astfel de vacuole se formează mai ales în izolaţia cablurilor, a transformatoarelor de putere şi de măsură şi a maşinilor electrice rotative.

Bulele de gaz din lichidele electroizolante se formează în momentul umplerii cu lichide electroizolante a cuvelor echipamentelor electrice datorită vaporizării lichidelor sau prin reţinerea aerului între anumite componente ale acestora. De asemenea, la punerea în funcţiune a echipamentelor noi sau a acelora care au suferit reparaţii, la atingerea regimului termic nominal, anumite substanţe volatile se pot evapora ceea ce conduce la apariţia bulelor de gaz.

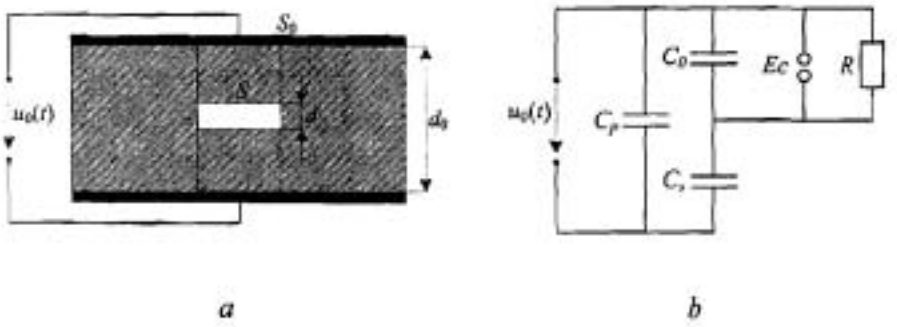
Studiile experimentale efectuate până în prezent au arătat că iniţierea şi dezvoltarea descărcărilor parţiale depind de formele şi dimensiunile cavităţilor dar şi de natura chimică şi presiunea gazului din acestea. Un fenomen important care influenţează producerea DP este reprezentat de difuzia gazelor din şi în interiorul cavităţilor. Acest fenomen de difuzie este lent şi în timpul său gazele îşi modifică compoziţia chimică datorită reacţiilor chimice care se iniţiază şi/sau se intensifică ca urmare a creşterii locale a temperaturii. De asemenea, tot datorită procesului de difuzie, presiunea gazelor din cavităţi se modifică ceea ce conduce la schimbarea caracteristicilor DP [2,13].

Într-un sistem de izolaţie în care sunt prezente cavităţi cu gaze se produc descărcări parţiale atunci când intensitatea câmpului electric din cavităţi E_c depăşeşte valoarea câmpului electric disruptiv E_a al gazului. Descărcările electrice parţiale se produc între pereţii opuşi ai cavităţii (gazul din vacuolă este străpuns) şi nu se propagă în restul izolaţiei, pe de o parte datorită rigidităţii dielectrice a sistemului de izolaţie mult mai mare decât cea a gazului şi, pe de altă parte, datorită faptului că intensitatea câmpului electric în izolaţia solidă este de câteva ori mai mică (ε_r) decât în gaz.

Fenomenul de străpungere a gazului din vacuolă poate fi descris cu ajutorul teoriei lui *Townsend*. Astfel, se presupune că are loc o străpungere în avalanşă ceea ce presupune existenţa a cel puţin un electron germene în apropierea catodului (peretele cavităţii). Electronii iniţiali se pot găsi în gaz (în funcţie de natura acestuia) sau pot fi emişi la interfaţa izolaţie-cavitate

datorită fenomenelor de injecție de sarcină.

Analiza fenomenelor fizice legate de producerea DP vor fi analizate, în continuare pe un model simplu constituit dintr-o vacuolă cilindrică cu gaz de arie S și înălțime d, aflată într-o izolație solidă omogenă de grosime d_0



a *b*

Fig. 4.1. *a* - Reprezentarea schematică a unei vacuole dintr-o izolație solidă; *b* - Schema echivalentă.

plasată între doi electrozi plani (fig. 4.1-*a*).

Schema electrică echivalentă a modelului fizic considerat este reprezentată în fig. 4.1-*b*. Astfel, vacuola poate fi modelată printr-o capacitate echivalentă C_0 care este conectată în serie cu o altă capacitate C_z (capacitatea straturilor înseriate cu cavitatea) și în paralel cu C_p (capacitatea zonelor laterale neatinse de vacuolă). Pentru a ține seama de fenomenul de străpungere a gazului din vacuolă (producerea descărcării), în paralel cu capacitatea C_0 se adaugă eclatorul *Ec*. Datorită producerii descărcării, capacitatea C_0 se descarcă, valoarea curentului de descărcare fiind limitată de conductivitatea electrică a dielectricului considerat, modelată prin rezistența electrică R.

Dacă tensiunea electrică aplicată celor doi electrozi crește, tensiunea pe vacuolă crește și ea în concordanță cu repartiția tensiunilor (care rezultă din raportul permitivităților) până când apare străpungerea gazului din vacuolă. Datorită străpungerii, tensiunea pe vacuolă va scădea practic la zero, eclatorul *Ec* va scurtcircuita condensatorul C_0, iar condensatorul în serie C_z se va încărca la întreaga tensiune aplicată izolației. Sarcina necesară pentru producerea acestui fenomen de încărcare se poate lua cel mai rapid

de la condensatorul C_p prin redistribuirea sarcinilor electrice de pe electrozi. Datorită sarcinii absorbite de pe plăcile condensatorului C_p, tensiunea între electrozi va înregistra o mică scădere. Aceasta se produce deoarece constanta de timp a circuitului de încercare din amonte este mai mare şi nu asigură compensarea suficient de rapidă a variaţiei de sarcină de pe plăcile condensatorului C_s.

Datorită acestor fenomene, la străpungerea vacuolei vor apare între electrozi descreşteri ale tensiunii în formă de impulsuri (fig. 4.2). La prima descărcare prin impuls, pe feţele opuse ale vacuolei se vor depune sarcini electrice care dau naştere unui câmp electric intern în vacuolă E_{sarc}, de sens contrar cu câmpul de bază E_c. Atunci când intensitatea câmpului electric în vacuolă scade sub o anumită valoare, descărcarea încetează iar sarcinile electrice se recombină datorită fenomenului de conducţie. Între timp, intensitate câmpului electric începe să crească din nou până la atingerea valorii tensiunii de străpungere şi sarcina acumulată se descarcă. În vacuolă se desfăşoară mai multe descărcări succesive, care se manifestă printr-un spectru de impulsuri.

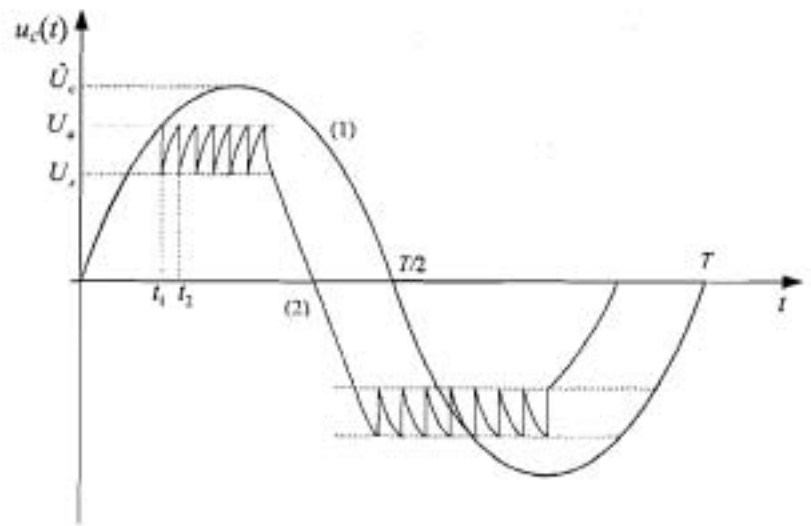


Fig. 4.2. Variaţia în timp a căderii de tensiunii pe cavitate la aplicarea unei tensiuni alternative: curba (1) în absenţa DP, curba (2) în prezenţa DP.

În situația în care tensiunea aplicată celor doi electrozi este constantă și are o valoare ușor superioară celei de amorsare a descărcărilor din vacuolă, atunci la apariția impulsurilor succesive, sarcinile legate de pe suprafața vacuolei dispar în totalitate. La aplicarea unor tensiuni mai mari este suficientă chiar o neutralizare parțială a acestor sarcini pentru amorsarea impulsului următor.

Ținând cont de faptul că valorile conductivității electrice a materialelor electroizolante este foarte redusă, sarcinile de pe suprafețele vacuolei dispar foarte încet. Prin urmare, dacă între cei doi electrozi se aplică o tensiune continuă, după primul impuls de descărcare nu au loc impulsuri succesive (spectru de impulsuri). Dacă după primul impuls tensiunea crește, atunci chiar în condițiile existenței unor sarcini pe suprafața vacuolei va putea apare o nouă descărcare prin impuls. Așa se explică, de pildă, că în cazul aplicării unei tensiuni alternative, până la atingerea valorii maxime, va exista întotdeauna posibilitatea apariției unui tren de impulsuri succesive.

La scăderea tensiunii va predomina câmpul creat de sarcinile separate pe pereții opuși ai vacuolei, iar descărcări prin impuls vor putea avea loc înaintea trecerii prin zero a intensității câmpului E_c. Prin descărcare, sarcina de pe suprafața vacuolei se va reduce până la valoarea corespunzătoare valorii tensiunii instantanee aplicate. La schimbarea polarității sarcina reziduală din vacuolă mărește intensitatea câmpului electric exterior, motiv pentru care descărcarea prin impuls va avea loc chiar la o tensiune mai mică.

Acțiunea descărcărilor parțiale asupra izolațiilor este determinată de cantitatea de energie electrică care se transmite întregului sistem, sub alte forme de energie. Producerea DP poate avea următoarele consecințe:

- crește temperatura locală a izolației ca urmare a producerii arcului electric dar și datorită ciocnirilor care au loc între purtătorii de sarcină existenți în gaz și accelerați de câmpul electric, pe de o parte, și moleculele de gaz și pereții cavităților, pe de altă parte;
- pereții cavităților în care se produc descărcările parțiale suferă un proces de erodare datorită ciocnirilor cu purtătorii de sarcină accelerați de câmp;

- sarcinile electrice depuse pe pereţii cavităţilor cu gaz difuzează în interiorul izolaţiilor (în regiunile din apropierea cavităţilor) şi conduc la apariţia unor zone cu densitate de sarcină spaţială mare, ceea ce determină modificarea repartiţiei câmpului electric.
- izolaţia este supusă local acţiunii radiaţiilor electromagnetice produse în urma fenomenelor de ionizare şi recombinare;
- reacţiile chimice de degradare sunt accelerate pe de o parte datorită creşterii valorii locale a temperaturii şi, pe de altă parte, produşilor chimici rezultaţi.

Datorită tuturor acestor factori, descărcările parţiale conduc la o înrăutăţire continuă a proprietăţilor sistemelor de izolaţie ceea ce se concretizează în reducerea drastică a duratei de viaţă ale acestora.

4.2.1.2. Calculul pierderilor corespunzătoare DP

Considerăm modelul fizic prezentat în fig 4.1-a şi presupunem că tensiunea aplicată celor doi electrozi este $u_0(t) = \hat{U}_0 \sin \omega t$. Căderea de tensiune pe cavitate este $u_c(t) = \hat{U}_c \sin \omega t$. În lipsa descărcărilor parţiale, notăm cu $\hat{E}_{iz}$ şi $\hat{E}_c$ valorile de vârf ale intensităţii câmpului electric în izolaţie, respectiv în interiorul cavităţii.

Pe suprafaţa de separaţie dintre cavitate şi izolaţia solidă, componenta normală a inducţiei electrice se conservă ceea ce ne permite să scriem următoarea relaţie:

$$\hat{E}_c \varepsilon_0 = \hat{E}_{iz} \varepsilon_0 \varepsilon_r, \tag{4.1}$$

în care ε_r reprezintă permitivitatea relativă a izolaţiei. Considerând că atât în interiorul cavităţii cât şi în izolaţie câmpul electric are o repartiţie uniformă, relaţia (4.1) poate fi scrisă:

$$\frac{\hat{U}_0 - \hat{U}_c}{d_0 - d} \varepsilon_r = \frac{\hat{U}_c}{d}. \tag{4.2}$$

Ţinând cont că $d << d_0$ şi că $\hat{U}_c << \hat{U}_0$, din relaţia (4.2) se obţine expresia valorii de vârf a tensiunii dintre pereţii cavităţii:

$$\hat{U}_c = \hat{U}_0 \frac{d}{d_0} \varepsilon_r . \tag{4.3}$$

Așa cum s-a explicat mai sus, descărcările electrice în cavitate se vor produce în momentul în care valoarea diferenței de potențial dintre pereții opuși ai cavității atinge o valoare de prag, numită *tensiune de amorsare* a descărcărilor U_a, sau, mai precis, dacă intensitatea câmpului electric în cavitate atinge valoarea E_a. Pentru calculul intensității câmpului electric E_a sunt utilizate anumite relații de calcul semi-empirice. De asemenea, E_a poate fi obținută din curbele lui *Paschen* în funcție de produsul dintre presiunea gazului și înălțimea cavității d.

Conform celor prezentate mai sus, amorsarea unei descărcări electrice în cavitate determină o reducere a tensiunii între pereții opuși ai acesteia, de la valoarea U_a până la o valoare U_s, numită *tensiune de stingere*, la care descărcarea se întrerupe (fig. 4.2 – curba 2). Fie E_s intensitatea câmpului electric corespunzător tensiuni de stingere U_s. Sarcina electrică transportată de o descărcare electrică se poate exprima prin relația:

$$q_d = C_c (U_a - U_s), \tag{4.4}$$

în care $C_c = \varepsilon_0 S / d$ reprezintă capacitatea electrică corespunzătoare cavității considerate. Ținând cont de formele tensiunilor considerate în fig 4.2, rezultă că numărul de descărcări parțiale $n_{T/4}$ produse într-un sfert de perioadă $T/4$ este:

$$n_{T/4} = \frac{\hat{U}_c - U_s}{U_a - U_s}, \tag{4.5}$$

ceea ce înseamnă că într-o semiperioadă se produc

$$n_{T/2} = 2 \frac{\hat{U}_c - U_s}{U_a - U_s} \tag{4.6}$$

descărcări electrice în cavitate.

Energia medie caracteristică producerii unei singure descărcări este egală cu energia necesară deplasării sarcinii q_d (corespunzătoare unei singure descărcări) acumulate pe pereții opuși ai cavității

($q_d = C_c(U_a - U_s)$) şi poate fi exprimată astfel:

$$w_{dm} = C_c(U_a - U_s)\frac{U_a + U_s}{2}, \tag{4.7}$$

în care s-a considerat că tensiunea medie aplicată cavităţii este egală cu media aritmetică a tensiunii de amorsare şi a celei de stingere a descărcărilor.

Prin urmare, ţinând cont de (4.7) energia corespunzătoare descărcărilor parţiale care se produc într-o semiperioadă este:

$$w_{sp} = n_{T/2} w_{dm} = C_c(\hat{U}_c - U_s)(U_a + U_s). \tag{4.8}$$

Presupunând că în izolaţie se găsesc N cavităţi cu gaz şi că acestea sunt identice cu cea considerată în fig. 4.1-a, puterea activă corespunzătoare descărcărilor parţiale se poate exprima cu următoarea relaţie:

$$\begin{aligned} P_{DP} &= 2fw_{sp}N \\ &= 2fN\varepsilon_0 \frac{S}{d}(\hat{U}_c - U_s)(U_a + U_s) \end{aligned} \tag{4.9}$$

Dacă se notează cu $\hat{E}_c = \hat{U}_c/d$ valoarea maximă a intensităţii câmpului electric în cavitate în absenţa descărcărilor parţiale (curba 1 – fig. 4.2) şi cu V_{cr} volumul celor N cavităţi raportat la volumul întregului izolant $V_{cr} = NAd/A_0d_0$, expresia puterii active corespunzătoare descărcărilor parţiale poate fi scrisă:

$$P_{DP} = 2fV_{cr}\varepsilon_0 d_0 S_0(\hat{E}_c - E_s)(E_a + E_s). \tag{4.10}$$

Examinând relaţia (4.10) se observă că valoarea pierderilor de energie datorate producerii descărcărilor parţiale în izolaţiile echipamentelor electrice depinde de frecvenţa şi intensitatea câmpului electric stabilit în cavităţi, de dimensiunile şi de numărul cavităţilor (prin V_{cr}), dar şi de caracteristicile gazului din cavităţi (prin E_a şi E_s).

Puterea reactivă Q dezvoltată în izolantul considerat poate fi calculată cu ajutorul următoarei relaţii:

$$|Q| = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S_0}{d_0} \frac{\hat{U}_0^2}{2} = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r S_0 h_0^2 \hat{E}_0^2, \qquad (4.11)$$

din care, ținând cont că $\hat{E}_c = \varepsilon_r \hat{E}_0$, rezultă:

$$|Q| = \pi f (\varepsilon_0 / \varepsilon_r) S_0 h_0 \hat{E}_c^2. \qquad (4.12)$$

Cu ajutorul expresiilor (4.10) și (4.12) se poate calcula factorul de pierderi $tg\delta_{DP}$ corespunzător descărcărilor parțiale produse în izolație:

$$tg\delta_{DP} = \frac{P_{DP}}{|Q|} = \frac{2\varepsilon_r V_{cr}}{\pi} \frac{(\hat{E}_c - E_s)(E_a + E_s)}{\hat{E}_c^2}. \qquad (4.13)$$

În ipotezele considerate mai sus, dacă se trasează curba $tg\delta_{DP}(\hat{E}_c / E_a)$ se constată că factorul de pierderi prezintă un maxim pentru $\hat{E}_c = 2E_s$.

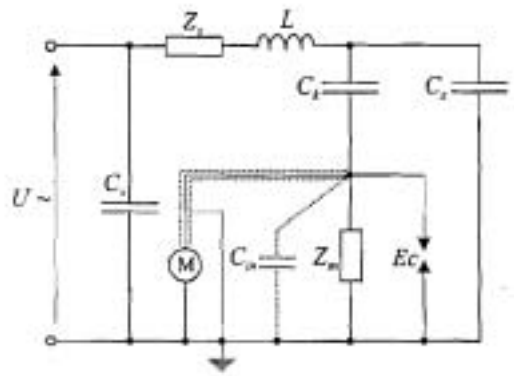
4.2.1.3. Detectarea și măsurarea nivelului DP

Pe baza celor arătate mai sus, rezultă că descărcările parțiale din cavitățile cu gaz situate în interiorul izolațiilor, conduc în timp la deteriorarea sistemelor de izolație și, prin urmare, la reducerea duratei de viață a mașinilor și echipamentelor electrice. Din acest motiv, o atenție deosebită este acordată detectării și elucidării cauzelor de producere a descărcărilor parțiale.

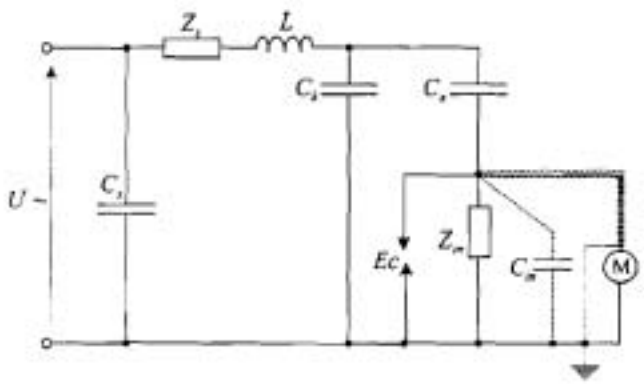
Așa cum rezultă din analiza fenomenelor fizice care au loc, datorită descărcărilor din vacuolă, pentru perioade scurte de timp, tensiunea aplicată izolației va scădea brusc ceea ce conduce la apariția unor impulsuri succesive care se reflectă în circuitul electric exterior prin impulsuri de curent. Prin urmare, detectarea și măsurarea nivelului DP se bazează pe detectarea impulsurilor de tensiune sau a celor de curent [27,3,13].

Ambele variante sunt în strânsă legătură cu sarcina electrică care se descarcă, deoarece integrala impulsului de curent sau produsul dintre capacitatea echivalentă și integrala impulsului de tensiune sunt egale cu

impulsul de sarcină. Această sarcină însă nu este egală cu aceea separată în vacuolă şi din acest motiv, este numită *sarcină aparentă*. Datorită acestui fapt, pentru măsurarea nivelului descărcărilor parţiale se iau în consideraţie sarcina aparentă q şi frecvenţa de repetiţie n a DP.



a



b

Fig. 4.3. Schemele de principiu utilizate pentru măsurarea nivelului descărcărilor parţiale: *a* - schema de măsură paralel, *b* – schema de măsură serie.

În fig. 4.3 sunt prezentate două variante ale schemei de măsurare *directă* a DP, în care capacitatea C_x reprezintă obiectul de încercat, capacitatea C_k este condensatorul de cuplare şi Z_m este impedanţa de măsură. Aparatul de măsură M conectat prin intermediul unui cablu de

măsură foarte bine ecranat, indică sau înregistrează căderile de tensiune pe impedanța Z_m. Capacitatea cablului și a aparatului de măsură distorsionează impulsurile de tensiune care apar la bornele impedanței de măsură Z_m. Impedanța de măsură împreună cu obiectul de încercat și condensatorul de cuplare, determină durata și forma impulsurilor măsurate. Impedanța de măsură poate fi construită astfel încât să filtreze componentele de joasă frecvență ale tensiunii de încercare și să aibă sensibilitatea maximă la frecvența impulsurilor de DP (în general aceasta este realizată sub forma unui cuadripol rezonant). Eclatorul *Ec* este introdus în schemă pentru protecție. Sursa de înaltă tensiune este reprezentată prin parametrii Z_i (impedanța internă) și C_i (capacitatea de ieșire). Așa cum se va explica în continuare, inductivitatea L are un rol foarte important în funcționarea schemei de măsură.

În urma producerii unei descărcări electrice în vacuolă (la fiecare impuls de sarcină), așa cum s-a arătat mai sus, tensiunea la bornele capacității C_x scade brusc. Această tensiune revine la valoarea ei normală atunci când pierderea de sarcină aparentă q este compensată de la sursa de alimentare. Inductanța L conectată în serie cu sursa are la frecvențe înalte o reactanță foarte mare și din acest motiv prin ea nu poate avea loc completarea sarcinii de pe armăturile condensatorului C_x. Fenomenele tranzitorii rapid variabile în timp rămân în circuitele desenate în schemă cu linii îngroșate. Circuitul de alimentare nu influențează măsurătorile DP.

Impulsul de tensiune de pe bornele obiectului de încercare în circuitul format din C_x—C_k—Z_m dă naștere unui impuls de curent a cărui formă și valoare de vârf depind de impedanța rezultantă a circuitului, cantitatea de sarcină q rămânând aceeași. Căderea de tensiune de pe bornele impedanței de măsură este sesizată și integrată prin aparatul de măsură M, care indică sau înregistrează o mărime proporțională cu sarcina aparentă q, conform relației:

$$\int u\mathrm{d}t = Z_m \int i\mathrm{d}t = Z_m q\,. \qquad (4.14)$$

Principiul de funcționare a celor două scheme prezentate în fig. 4.3 este același. Diferențele importante care se înregistrează între acestea țin numai de nivelul perturbațiilor exterioare și de siguranța în funcționare.

În cazul schemei de măsură paralel (fig. 4.3-a) impedanţa de măsură este înseriată cu condensatorul de cuplare şi obiectul de încercat este conectat, în paralel, la bornele acestora. În acest caz instrumentul de măsură indică numai valoarea curentului prin această ramură a schemei. De altfel, în acest caz, impedanţa ramurii (cel puţin pentru banda de frecvenţă a impulsurilor de DP) trebuie să fie mult mai mică decât cea a sursei. Din acest motiv, inductanţa L are rolul să separe din punct de vedere al frecvenţelor înalte, circuitele de măsură de cele de alimentare. La frecvenţă industrială însă, inductanţa trebuie să comunice tensiunea de alimentare (fără o cădere de tensiune sesizabilă) obiectului de încercat.

Adesea, în locul inductanţei L se utilizează un filtru trece jos. Mai mult, în cazul când $C_x << C_k$ inductanţa L poate chiar să lipsească, dacă măsurătorile nu sunt perturbate de semnale parazite de înaltă frecvenţă provenite din circuitul de alimentare.

Capacitatea condensatorului de cuplare C_k trebuie să aibă o valoare cât mai mare. Totuşi, o valoare prea mare a capacităţii C_k, atrage după sine micşorarea reactanţei lui capacitive la 50 Hz, şi creşterea căderii de tensiune la bornele impedanţei de măsură Z_m, ceea ce complică utilizarea instalaţiei de măsură din punct de vedere al siguranţei de funcţionare.

În cazul schemei de măsură serie, impedanţa de măsură este conectată în serie cu obiectul de încercat şi nu mai este nevoie de separarea circuitelor de alimentare, deoarece impulsul de curent datorat descărcărilor parţiale străbate în întregime impedanţa Z_m. Dezavantajul acestei scheme constă în faptul că la străpungerea izolaţiei, în circuitele de măsură pot să apară tensiuni periculoase. De asemenea, în cazul schemei serie căderea de tensiune de 50 Hz pe impedanţa Z_m depinde de capacitatea obiectului de încercat, care se deosebeşte de la caz la caz şi poate să varieze în timp.

În cazul ambelor scheme prezentate în fig. 4.3, în circuitele de măsură va apare întotdeauna o componentă a tensiunii de 50 Hz. Din acest motiv, instrumentul de măsură M trebuie să conţină întotdeauna un filtru care să permită numai trecerea benzii de frecvenţă corespunzătoare descărcărilor parţiale. DP pot însă să conţină şi componente mai lente, care, datorită filtrului nu vor fi înregistrate.

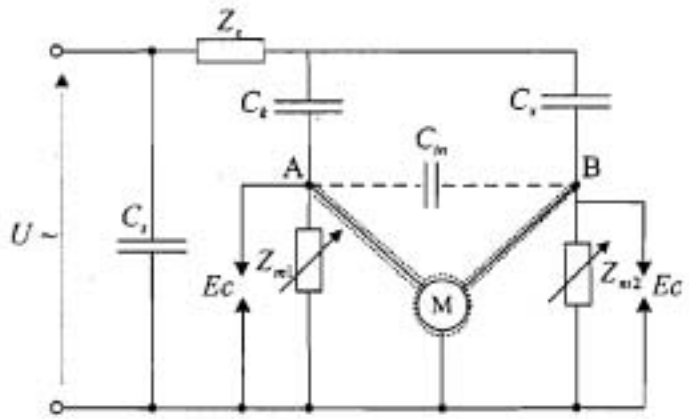


Fig. 4.4. Schema în punte utilizată pentru detectarea și măsurarea nivelului descărcărilor parțiale.

Pentru eliminarea unei părți din dezavantajele celor două scheme de măsură descrise anterior, poate fi utilizată o schemă mai complexă, *în punte*, prezentată în fig. 4.4. Această schemă conține două impedanțe de măsură care permit echilibrarea tensiunilor dintre nodurile *A* și *B* și eliminarea perturbațiilor și a componentei de 50 Hz din circuitele de măsură. Prin aceasta se poate mări sensibilitatea instrumentului de măsură și se creează condiții mai bune pentru măsurători în bandă largă, deoarece perturbațiile în acest caz se pot elimina practic complet. Cu o astfel de instalație se pot detecta impulsuri de DP de durate mult mai mari.

Instalațiile de măsură sesizează întotdeauna sarcina aparentă q corespunzătoare. Pe baza acesteia se pot obține și alte mărimi derivate cu ajutorul cărora se caracterizează nivelul descărcărilor parțiale (o parte dintre acestea sunt normalizate) [3,28]:

- *energia aparentă* W a descărcărilor parțiale ce se măsoară în Joule și se poate determina cu ajutorul relației:

$$W = \frac{1}{2} q \sqrt{2} U_i , \tag{4.15}$$

în care q este sarcina aparentă determinată la tensiunea de apariție a DP în C și U_i este tensiunea aplicată izolației în momentul apariției DP, exprimată în volți;

- *curentul mediu aparent* I ce se determină într-un interval de timp T pe baza sarcinii aparente cu ajutorul următoarei relaţii:

$$I = \frac{1}{T}\left(|q_1| + |q_2| + ... + |q_n|\right); \tag{4.16}$$

- *debitul pătratic* D al sarcinii aparente ce se calculează, ca şi curentul mediu aparent într-un interval de timp T şi se exprimă în C^2/s sau în A^2s:

$$D = \frac{1}{T}\left(q_1^2 + q_2^2 + ... + q_n^2\right); \tag{4.17}$$

- *puterea aparentă medie* P corespunzătoare DP care se calculează pornind de la energia spectrului de impulsuri pe porţiunea activă a curbei tensiunii şi se raportează la valoarea intervalului de timp τ:

$$P = \frac{1}{\tau}\left[W_1 + W_2 + ..W_n\right], \tag{4.18}$$

în care W_i se calculează cu ajutorul relaţiei (4.15).

Dintre mărimile derivate enumerate mai sus utilizate pentru caracterizarea DP, cel mai adesea se calculează curentul mediu aparent I. De asemenea, trebuie menţionat că energia aparentă W nu este egală cu energia dezvoltată în vacuolă şi, în consecinţă, nu oferă o imagine exactă asupra nocivităţii DP.

Caracterizarea nocivităţii DP se face cu ajutorul sarcinii aparente q exprimată în picocoulombi şi a frecvenţei de repetiţie a descărcărilor parţiale n (numărul de impulsuri DP din unitatea de timp).

Detectarea şi măsurarea descărcărilor parţiale necesită utilizarea unor instalaţii şi echipamente de măsură foarte performante. Constrângerile cele mai importante provin din faptul că mărimile măsurate au valori foarte reduse, comparabile cu cele ale zgomotului de reţea. Spre exemplu, sarcina impulsurilor singulare poate să atingă şi 10^{-9} C, limita teoretică inferioară a acestora fiind egală cu sarcina elementară. Instalaţiile de detectare şi măsură a nivelului descărcărilor parţiale utilizate în prezent, permit în mod uzual măsurarea unor valori ale sarcinii aparente de ordinul $10^{-15} \div 10^{-14}$ C. Valoarea corespunzătoare a curentului mediu aparent al DP începe de la $10^{-12} \div 10^{-10}$ A. De asemenea, o altă cerinţă importantă vizează faptul că

echipamentele de măsură trebuie să aibă o rezoluție suficient de mare, astfel încât să poată separa impulsurile care diferă între ele cu câteva ordine de mărime și care se succed rapid unul după altul. Instalațiile de măsură nu trebuie să fie afectate de semnalele perturbatoare interne și externe care însoțesc inevitabil toate măsurătorile de înaltă frecvență.

Conform normelor aflate în vigoare, performanțele unei instalații de măsurare a nivelului DP sunt evaluate pe baza unor caracteristici dintre care cele mai importante sunt: *sensibilitatea de fond* a instalației *S, frecvența centrală* f_0, *lărgimea benzii de trecere* Δf și *timpul de rezoluție* T_r.

Sensibilitatea de fond a întregului circuit de detectare a DP este funcție de zgomotul de fond și se determină din două măsurători succesive. La prima măsurătoare se notează indicația instrumentului de măsură datorată zgomotului de fond. După aceasta, în schema de măsură se aplică un impuls de tensiune cunoscut, printr-o capacitate de calibrare la bornele obiectului de încercat. Amplitudinea acestui impuls de calibrare se mărește până ce deviația acului indicator va egala dublul valorii indicate la prima măsurătoare. Sensibilitatea de fond S a instalațiilor de măsurare a impulsurilor singulare este egală chiar cu sarcina impulsului de calibrare corespunzătoare. La măsurarea caracteristicilor integrale ale DP sensibilitatea de fond a instalației se poate deduce și prin calcul din valoarea impulsului singular.

Frecvența centrală f_0 a circuitului sau instrumentului de măsură este legată de durata impulsurilor măsurate. În cazul instrumentelor de bandă îngustă, frecvența centrală va fi egală cu frecvența de rezonanță la intrarea în instrument. La instrumentele cu bandă largă, frecvența centrală f_0 depinde de valorile frecvențele de tăiere f_1 (inferioară) și f_2 (superioară), și este calculată cu relația $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$.

Lărgimea benzii de trecere a instrumentelor de bandă îngustă reprezintă acea porțiune a caracteristicii de frecvență în interiorul căreia atenuarea răspunsului dat de instrumentul respectiv este mai mică de -3 dB, față de valoarea corespunzătoare a frecvenței centrale.

Lărgimea benzii instrumentelor de măsură în bandă largă se definește în mod similar, atenuarea fiind raportată la semnalul de pe palierul

caracteristicii de frecvenţă.

Timpul de rezoluţie a impulsurilor DP reprezintă intervalul de timp cel mai scurt dintre două impulsuri succesive la care eroarea de amplitudine datorită suprapunerii acestor impulsuri este mai mică de 10%. Timpul de rezoluţie T_r este invers proporţional cu lărgimea de bandă a circuitului sau instrumentului de măsură.

În afară de aceste mărimi menţionate mai sus, o instalaţie de măsurare a DP poate fi caracterizată prin *rezerva de liniaritate* a amplificatorului, *durata maximă şi minimă a impulsurilor detectabile, impedanţa de intrare, deriva termică* etc.

Pe lângă aparatura specifică de măsurare a nivelului DP axată pe măsurarea sarcinii aparente q, a curentului mediu I sau a debitului pătratic D, impulsurile de DP sunt investigate şi cu ajutorul unor receptoare de radioperturbaţii (produse de amorsarea descărcărilor), cu contoare de impulsuri (pentru măsurarea frecvenţei de repetiţie) sau indirect, prin *metode neelectrice*.

Aparatele de recepţionare a radioperturbaţiilor corespunzătoare DP sunt reprezentate de microvoltmetre de frecvenţă selectivă, cu bandă îngustă de trecere (9 kHz).

Instrumentele de măsurare a frecvenţei de repetiţie sunt contoare de impulsuri, care indică fie numărul total de impulsuri într-un interval de timp dat, fie numărul mediu de impulsuri într-o secundă, fie numărul impulsurilor care au o valoare de amplitudine dată.

În ceea ce priveşte metodele neelectrice utilizate pentru detectarea DP, există anumite tehnici de măsură bazate pe utilizarea unor sesizoare acustice sau optice.

În prezent, maşinile electrice şi transformatoarele de puteri mari şi foarte mari au montate, în zonele în care apariţia descărcărilor parţiale este cea mai probabilă, senzori care sesizează apariţia şi producerea DP.

Instalaţiile performante pentru măsurarea nivelului DP folosesc echipamente de măsură digitale care permit înregistrarea simultană a mai multor mărimi precum: sarcina aparentă, numărul de impulsuri, valoarea de vârf a impulsurilor, etc.

Pentru cercetarea originii şi locului de producere a DP este interesant

să se afle intervalul de apariție a impulsurilor față de faza tensiunii înalte aplicate. Pentru acest scop, în afară de instrumentul de măsură, schemele de măsură se completează cu un osciloscop având baleiajul sincronizat cu o tensiune de aceeași frecvență ca și cea a tensiunii înalte aplicate. Diagramele din figurile 4.5. - 4.9, care conțin variația sarcinii aparente q în funcție de tensiunea aplicată și oscilograma tensiunii, sunt recomandate de *Comitetul Electrotehnic Internațional* în scopul de a ușura diagnosticarea originii DP.

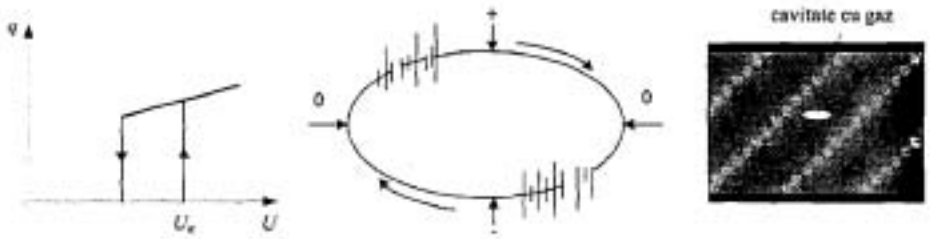


Fig. 4.5. Descărcări parțiale într-o cavitate cu gaz situată în interiorul unei izolații [3].

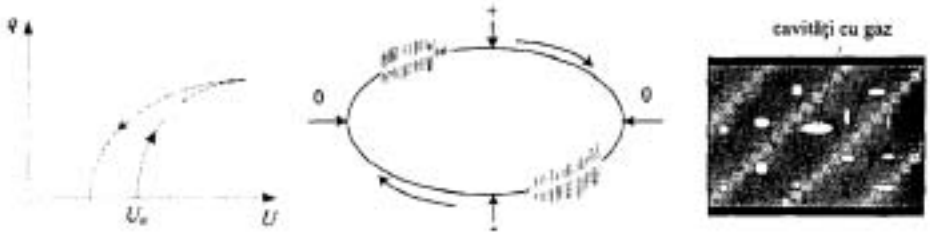


Fig. 4.6. Descărcări parțiale în mai multe cavități cu gaz situate într-o izolație [3].

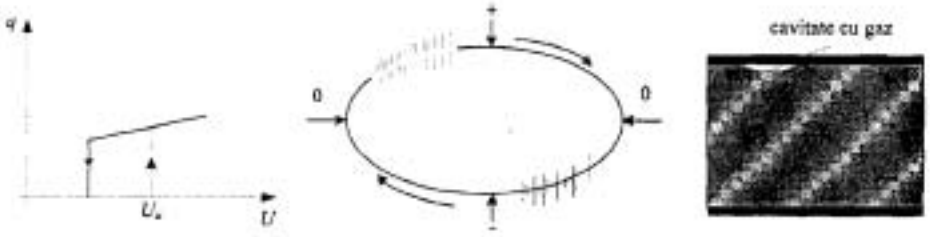


Fig. 4.7. Descărcări parțiale într-o cavitate situată la interfața conductor – izolație [3].

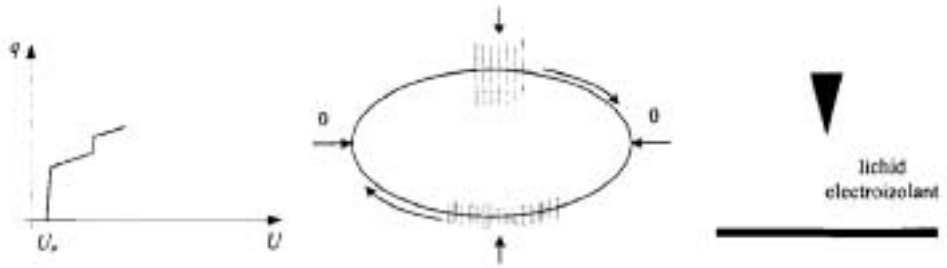


Fig. 4.8. Descărcări parţiale produse în jurul unui vârf metalic situat într-un lichid electroizolant (sistemul de electrozi vârf – placă) [3].

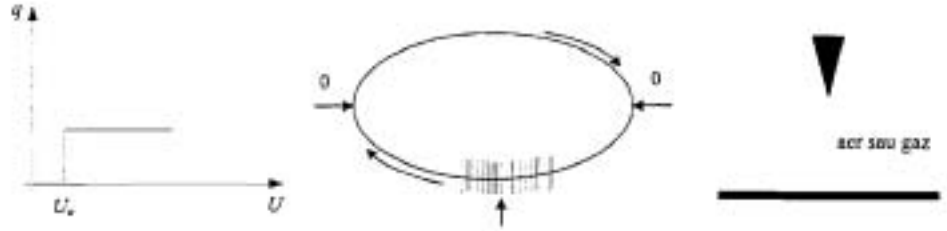


Fig. 4.9. Descărcări parţiale produse în apropierea unui vârf metalic situat în aer sau într-un alt gaz [3].

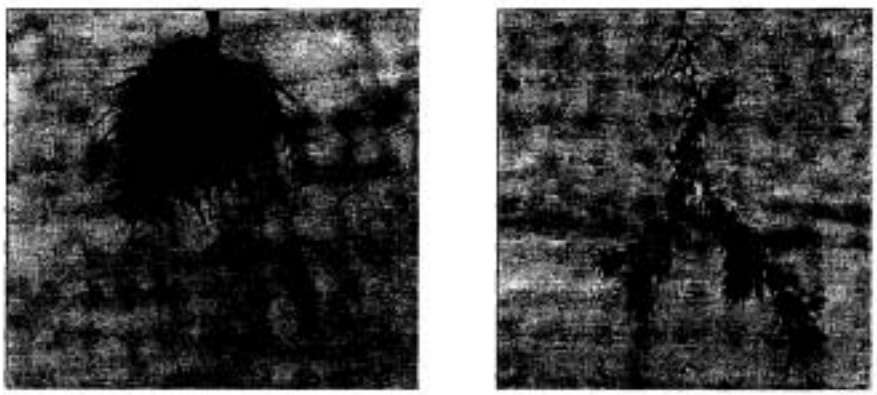
4.2.2. Arborescenţe electrice şi electrochimice

În anumite condiţii, în izolaţiile solide ale echipamentelor electrice apar zone difuze, caracterizate de prezenţa unor mici cavităţi şi a unor reţele de canale foarte fine. Aceste formaţiuni au fost denumite, în funcţie de natura lor, *arborescenţe electrice* şi *arborescenţe electrochimice* (sau *arborescenţe de apă*). Apariţia arborescenţelor este direct legată de existenţa unor concentraţii importante ale câmpului electric apărute datorită unor defecte cum ar fi impurităţi metalice, muchii metalice ascuţite, cavităţi cu gaze, etc. În funcţie de natura şi intensitatea solicitărilor la care sunt supuse sistemele de izolaţie, arborescenţele se pot dezvolta în intervale de timp relativ scurte comparativ cu durata de funcţionare obişnuită a echipamentelor electrice. Iniţierea şi dezvoltarea arborescenţelor constituie o deteriorare severă a izolaţiilor şi, în timp, acestea conduc la producerea fenomenului de străpungere.

4.2.2.1. Arborescenţe electrice

Arborescenţele electrice sunt constituite dintr-o multitudine de canale foarte fine în interiorul cărora se găsesc gaze la presiuni ridicate. Canalele arborescenţelor electrice se formează în timpul funcţionări echipamentelor electrice prin distrugerea locală a izolaţiei sub acţiunea combinată a câmpului electric, descărcărilor parţiale (din canalele şi cavităţile arborescenţei), căldurii, gazelor sub presiune, etc. Arborescenţele electrice pot să apară în imediata vecinătate a unui electrod metalic, caz în care se numesc *arborescenţe deschise* (fig. 4.10), sau în interiorul izolaţiei, în lungul liniilor de câmp electric, de o parte şi de cealaltă a unui defect, caz în care se numesc *arborescenţe nod de papion* [29]

Aşa cum se observă în fig. 4.10, arborescenţele deschise pot să aibă diverse forme: tufiş, tufiş cu ramuri, arbore, etc. Arborescenţele tip tufiş sunt alcătuite din canale foarte fine, dispuse foarte aproape unul de altul. Arborescenţele de tip tufiş cu ramuri sunt foarte asemănătoare cu cele de tip tufiş cu deosebirea că, în plus, acestea conţin mai multe ramuri care ies din interiorul tufişului. Arborescenţele tip arbore conţin un canal central cu un diametru de câteva zeci de micrometrii din care se ramifică canale filamentare.



a *b*

Fig. 4.10. Arborescenţe electrice deschise în izolaţia din polietilenă a unui cablu de energie; *a*- arborescenţe de tip tufiş; *b* - arborescenţe de tip arbore [30].

Studiile efectuate până în prezent au arătat că formele arborescenţelor electrice dezvoltate în polimeri sunt în strânsă legătură cu intensitatea câmpului electric. În cazul câmpurilor electrice foarte intense, în general se dezvoltă arborescenţe de tip tufiş cu ramuri, în timp ce pentru câmpuri electrice mai reduse arborescenţele electrice au formă de arbore [2].

Fenomenul de arborescenţă electrică a fost studiat în mai multe laboratoare de cercetare. Izolaţiile în care au fost iniţiate şi dezvoltate arborescenţe electrice au fost alese în aşa fel încât să permită vizualizarea acestor fenomene (de aceea, cele mai multe arborescenţe electrice au fost dezvoltate în polietilenă şi răşini epoxidice). Cel mai folosit sistem de electrozi este cel ac-plan, datorită faptului că la vârful acului se obţin intensităţi foarte mari ale câmpului electric.

Formarea unei arborescenţe electrice presupune parcurgerea a trei etape: iniţierea, dezvoltarea şi creşterea nestăvilită. Faza de iniţiere este caracterizată de o durată de iniţiere t_i, care se defineşte ca fiind intervalul de timp necesar pentru apariţia unei arborescenţe observabile. Durata de iniţiere t_i depinde foarte mult de intensitatea câmpului electric; în cazul câmpurilor electrice variabile în timp, aceasta variază invers proporţional cu frecvenţa [13].

S-a constatat că arborescenţele electrice dezvoltate în jurul unor cavităţi mari se deosebesc net de cele formate în apropierea vârfurilor metalice. Arborescenţele dezvoltate din cavităţi nu pot fi iniţiate decât dacă intensitatea locală a câmpului electric depăşeşte o valoare de prag care depinde de mărimea cavităţii şi de proprietăţile dielectrice ale izolaţiei.

Procesul de dezvoltare şi propagare a arborescenţelor electrice nu este continuu, prezentând creşteri bruşte ale dimensiunilor arborescenţelor urmate de străpungeri locale ale izolaţiei. După apariţia primului canal, arborescenţele se dezvoltă prin formarea, după anumite intervale de timp, a altor ramuri. De asemenea, există perioade de stagnare în dezvoltarea arborescenţelor; acestea sunt însă considerate ca fiind perioade de iniţiere a altor ramuri. În aceste perioade se înregistrează o mărire a diametrelor canalelor existente, fenomen ce are la bază descărcările parţiale produse în interiorul acestor canale. După formarea unui anumit număr de ramuri, o

parte dintre acestea se dezvoltă în continuare, în timp ce, altele stagnează. În faza finală de dezvoltare a arborescențelor electrice se produce o creștere accelerată a acestora, formându-se ramuri noi pornind de la vârfurile celor existente. În final, se formează un canal suficient de mare, ce se întinde pe întreaga grosime a izolației care conduce, după un anumit interval de timp la producerea fenomenului de străpungere.

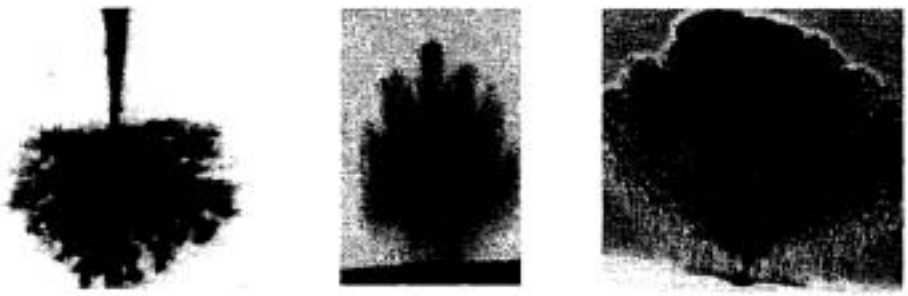
Datorită importanței lor în procesul de degradare a izolațiilor echipamentelor electrice, arborescențele electrice au constituit subiectul unor cercetări foarte ample realizate de numeroase echipe de cercetători. Aspectele urmărite au fost acelea legate de inițierea și dezvoltarea arborescențelor, precum și de factorii de influență principali. În studiile de laborator efectuate până în prezent, inițierea și dezvoltarea arborescențelor electrice au fost urmărite prin mai multe metode dintre care cele mai des utilizate au fost cele optice (folosite acolo unde izolația permite vizualizarea directă a arborescențelor), cele bazate pe emisia de unde sonore, spectroscopia în infraroșu, rezonanță electronică de spin și metode bazate pe analiza emisiilor de gaze.

4.2.2.2. Arborescențe de apă

În cazul sistemelor de izolație care funcționează în medii umede, sub acțiunea câmpului electric, moleculele de apă difuzează în interiorul acestora, ceea ce conduce la apariția arborescențelor electrochimice (numite și arborescențe de apă). Prin urmare, arborescențele de apă constituie zone difuze din interiorul izolațiilor polimerice care sunt constituite dintr-o mulțime de microcavități umplute cu apă legate între ele printr-un număr mare de canale foarte fine. Studiile efectuate în acest domeniu au arătat că arborescențele de apă se pot dezvolta în toate izolațiile alcătuite din poliolefine și că principala consecință a apariției și dezvoltării acestora este scăderea valorii tensiunii de străpungere. În foarte multe cazuri, asemenea arborescențe se întâlnesc în izolațiile polimerice ale cablurilor de medie și înaltă tensiune.

Ca și în cazul arborescențelor electrice, câmpul electric constituie factorul cheie în inițierea și dezvoltarea arborescențelor de apă. Prin urmare, acestea se formează tot în vecinătatea defectelor din izolații sau de la

suprafaţa lor şi se dezvoltă pe direcţia liniilor de câmp. Atunci când arborescenţele de apă au ca punct de plecare defectele superficiale (interfaţa metal – izolator sau semiconductor – izolator, acestea se numesc arborescenţe deschise şi în funcţie de aspectul lor, pot fi de tip alge, tufiş, pană, ferigă, ş.a. (fig. 4.11) [31,32]. În situaţia în care arborescenţele de apă se formează în vecinătatea defectelor (incluziunilor) aflate în interiorul izolaţiilor, acestea poartă denumirea de arborescenţe nod de papion (fig. 4.12).



a *b* *c*

Fig. 4.11. Arborescenţe de apă deschise; *a* - arborescenţă deschisă formată la vârful unui ac de apă în PE; *b* - arborescenţă formată dinspre ecranul semiconductor interior în izolaţia din polietilenă a unui cablu de energie; *c* - arborescenţă formată dinspre ecranul semiconductor exterior în izolaţia din polietilenă a unui cablu de energie [2].

Fig. 4.12. Arborescenţă de apă tip nod de papion în polietilenă [2].

Una dintre cele mai importante consecințe ale formării arborescențelor de apă este creșterea conținutului de apă din izolațiile echipamentelor electrice. Datorită caracterului puternic polar al apei, apar zone cu permitivități electrice foarte ridicate, în care se găsesc concentrații mari de ioni. Anumite studii experimentale au evidențiat o creștere foarte mare a conținutului de apă din izolațiile cablurilor datorită formării arborescențelor. Astfel, dacă în izolația din polietilenă a unui cablu concentrația de apă nu depășește, în mod uzual 0,01%, în prezența arborescențelor aceasta poate crește până la 1%.

În urma cercetărilor efectuate s-a constatat că arborescențele deschise și cele nod de papion se dezvoltă diferit. Rezultatele obținute pe eșantioane de polietilenă au pus în evidență faptul că, la început, imediat după inițiere, arborescențele nod de papion se dezvoltă rapid, pentru ca apoi, dimensiunile lor să rămână practic neschimbate. În mod contrar, arborescențele deschise înregistrează, în general, o dezvoltare continuă, în anumite condiții acestea traversând întreaga izolație și determinând producerea străpungerii.

În procesul de formare a arborescențelor electrochimice se pot distinge două faze: faza de inițiere, caracterizată de o durată t_i și faza de dezvoltare propriu zisă caracterizată de o durată t_d. Durata de inițiere este definită ca fiind intervalul de timp scurs între momentul aplicării câmpului electric și momentul în care arborescențele de apă ating dimensiunile necesare pentru a putea fi detectate. Durata de dezvoltare reprezintă intervalul de timp scurs între momentul inițierii arborescenței și momentul în care aceasta a ajuns la o lungime oarecare l_d. Dincolo de evidențierea celor două etape care intervin în formarea unei arborescențe electrochimice, caracterizarea globală a acestui fenomen se face, în majoritatea cazurilor, cu ajutorul *duratei de dezvoltare* τ, care reprezintă suma dintre t_i și t_d (intervalul de timp scurs între momentul aplicării tensiunii și momentul în care arborescența atinge lungimea l_d). Studiile efectuate până în prezent în cadrul *Laboratorului de Materiale Electrotehnice* din cadrul *Universității „Politehnica" București*, dar și în alte laboratoare din lume, au pus în evidență faptul că dezvoltarea arborescențelor de apă în izolațiile polimerice depinde de mai mulți factori printre care cei mai importanți sunt natura și structura materialului, intensitatea și frecvența câmpului electric, natura și

concentraţia electrolitului, solicitările mecanice, temperatura, etc.

a) Influenţa câmpului electric

Rolul câmpului electric în apariţia şi dezvoltarea arborescenţelor de apă este foarte important. Sub acţiunea acestuia, ionii de apă pătrund în izolaţie, antrenând totodată şi moleculele de apă care contribuie la dezvoltarea arborescenţelor. Rezultatele experimentale obţinute până în prezent au arătat că formarea arborescenţelor de apă este condiţionată de existenţa unui câmp electric a cărui intensitate să fie superioară unei valori critice dependentă de starea sistemului de izolaţie.

De asemenea, trebuie menţionat şi faptul că prezenţa arborescenţelor de apă în sistemele de izolaţie determină modificarea locală a repartiţiei spaţiale a câmpului electric. Datorită prezenţei apei, permitivitatea zonei arboase creşte foarte mult şi intensitatea câmpului electric în această zonă se reduce semnificativ. Prin urmare, solicitările electrice în zonele adiacente arborescenţei cresc foarte mult, fapt ce poate conduce la apariţia străpungeri. Studiile experimentale realizate de *Notingher* şi *Radu* [33] pe eşantioane din polietilenă şi electrozi ac metalic – ac de apă, au arătat că, în cele mai multe cazuri, canalul de străpungere ocoleşte arborescenţa (fig. 4.13).

Fig. 4.13. Canalul de străpungere în prezenţa unei arborescenţe de apă dezvoltate în polietilenă utilizand sistemul de electrozi ac metalic – ac de apă [29].

O altă observaţie foarte importantă se referă la influenţa sarcinii electrice spaţiale formate, în cea mai mare parte, de ionii de apă existenţi în canalele arborescenţelor asupra repartiţiei câmpului electric în izolaţie. Calculele numerice efectuate de diverşi cercetători au arătat că această sarcină spaţială conduce la o intensificare locală a câmpului electric.

b) Influenţa frecvenţei câmpului electric

Frecvenţa câmpului electric aplicat constituie un alt factor important care intervine atât în faza de iniţiere cât şi în cea de dezvoltare a arborescenţelor de apă. S-a remarcat că iniţierea şi dezvoltarea arborescenţelor de apă sunt cu atât mai rapide cu cât frecvenţa câmpului electric este mai mare.

c) Influenţa naturii electrolitului

Studiile realizate până în prezent au arătat că dezvoltarea arborescenţelor de apă în izolaţiile polimerice depinde foarte mult de natura sărurilor conţinute în apă. Astfel, s-a constatat că în cazul utilizării soluţiilor de NaCl sau $CuSO_4$, viteza de creştere a arborescenţelor de apă este sensibil mai mare decât în cazul utilizării apei pure. De asemenea, concentraţia sărurilor are un efect important asupra dezvoltării arborescenţelor. În general, se constată că dezvoltarea arborescenţelor este mai rapidă dacă concentraţia de săruri creşte. Pentru concentraţii mai mari decât anumite valori critice proprii fiecărui material, se înregistrează scăderi ale vitezei de dezvoltare a arborescenţelor.

d) Influenţa arborescenţelor de apă asupra proprietăţilor electrice ale izolaţiilor

Apariţia şi dezvoltarea arborescenţelor de apă determină o înrăutăţire a proprietăţilor dielectrice ale sistemelor de izolaţie. S-a remarcat că în prezenţa arborescenţelor de apă se produce creşterea conductivităţii electrice, a factorului de pierderi, a permitivităţii globale şi o scădere a rigidităţii dielectrice. Anumite aspecte referitoare la aceste modificări pot fi explicate pe baza creşterilor importante ale concentraţiilor de apă şi ioni în

zonele cu arborescenţe.

Măsurătorile efectuate pe eşantioane din polietilenă în care au fost dezvoltate arborescenţe de apă au pus în vedere creşteri foarte importante ale conductivităţii electrice (cu până la trei ordine de mărime mai mari decât în cazul polietilenei fără arborescenţe).

Studiile efectuate de *Densley* [34] pe cabluri de energie cu tensiunea nominală de 5 kV izolate cu polietilenă, au arătat că factorul de pierderi tgδ creşte odată cu apariţia şi dezvoltarea arborescenţelor de apă (fig. 4.14). Rezultate similare au fost obţinute şi de alţi cercetători.

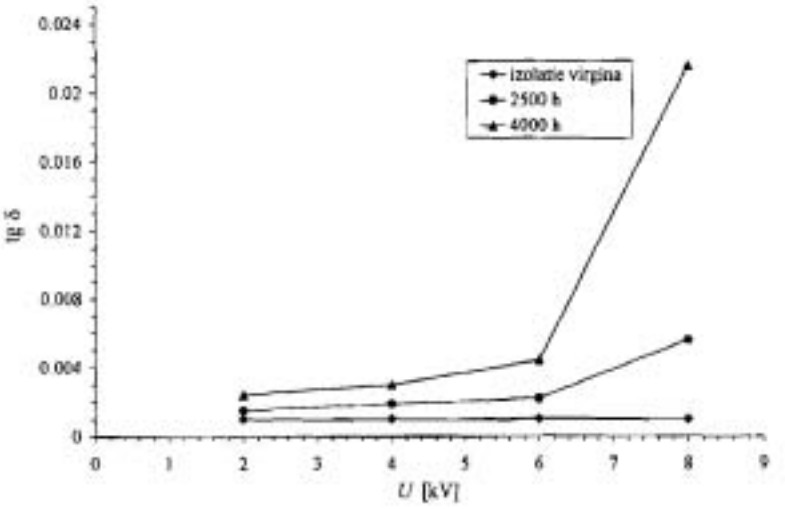


Fig. 4.14. Variaţia factorului de pierderi în funcţie de tensiunea aplicată în cazul cablurilor de energie cu tensiunea nominală de 5 kV cu şi fără arborescenţe de apă [32].

Măsurătorile efectuate de *Koo* [35] au indicat că în zonele cu arborescenţe, permitivitatea relativă poate varia între 4 şi 6. Alte măsurători realizate de *Stucki* [36] pe eşantioane de cabluri cu izolaţie de polietilenă în care s-au dezvoltat arborescenţe de apă, au arătat că ε_r poate ajunge până la 3,6. *Radu* [37] a realizat un studiu experimental privind variaţia permitivităţii relative a polietilenei în funcţie de durata de dezvoltare a arborescenţelor (fig. 4.15) şi a arătat că permitivitatea creşte odată cu creşterea dimensiunilor arborescenţelor şi cu durata de aplicare a tensiunii.

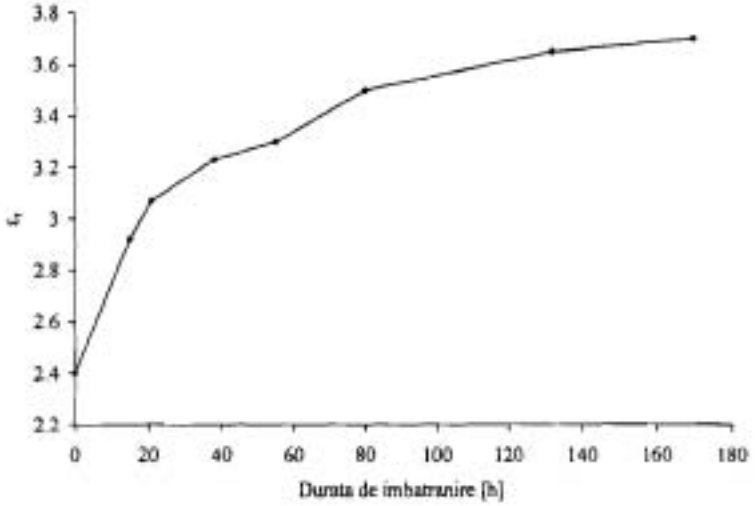


Fig. 4.15. Variaţia permitivităţii relative în funcţie de durata de aplicare a tensiunii pentru eşantioane de polietilenă cu arborescenţe de apă [37].

De asemenea, s-a constatat că rigiditatea dielectrică a eşantioanelor plane din polietilenă scade atunci când lungimile arborescenţelor de apă cresc. Aşa cum s-a explicat anterior, acest lucru se datorează intensificării câmpului electric în zonele din imediata vecinătate a arborescenţelor, ceea ce conduce la producerea descărcărilor parţiale, apariţia arborescenţelor electrice şi, în final, la străpungerea materialului. Pe de altă parte, dezvoltarea arborescenţelor de apă are ca urmare reducerea grosimii efective (utile) a izolaţiei, fapt ce explică rezultatele experimentale obţinute. *Noţingher* şi *Radu* [33] au arătat că în cazul eşantioanelor din polietilenă, utilizând sistemul de electrozi ac metalic – ac de apă, tensiunea de străpungere poate să scadă cu 25% în funcţie de lungimea arborescenţei dezvoltate (fig. 4.16).

Un alt aspect foarte important care a fost pus în vedere în cadrul anumitor studii şi care are o însemnătate aparte în ceea ce priveşte fenomenul de străpungere, constă în apariţia şi dezvoltarea unor arborescenţe electrice la vârful arborescenţelor de apă cu lungimi mari. Formarea şi propagarea arborescenţelor electrice în continuarea arborescenţelor de apă nu este pe deplin explicată. Totuşi, se presupune că

factorul determinant este reprezentat de câmpul electric a cărui intensitate creşte foarte mult în imediata vecinătate a arborescenţei de apă.

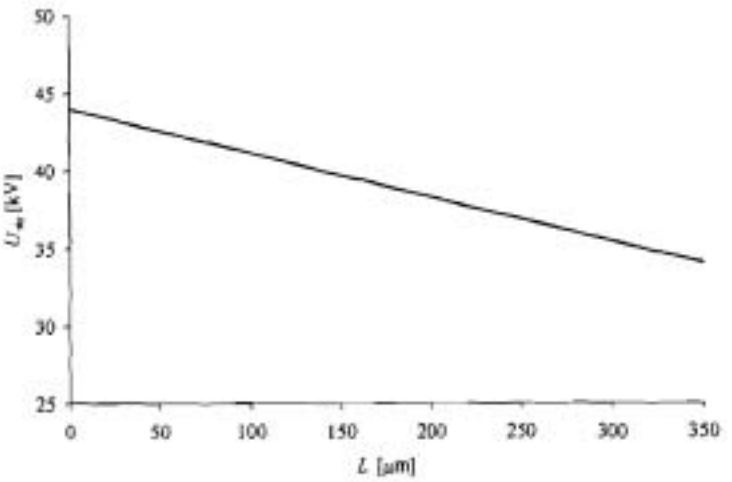


Fig. 4.16. Variaţia tensiunii de străpungere în cazul eşantioanelor din polietilenă cu sistemul de electrozi ac metalic – ac de apă în care au fost dezvoltate arborescenţe la $U = 5$ kV şi $f = 12{,}5$ kHz [2].

5. METODE DE ÎNCERCARE ŞI DE DETERMINARE A DURATEI DE VIAŢĂ A SISTEMELOR DE IZOLAŢIE

5.1. Încercările sistemelor de izolaţie

5.1.1. Tipuri de încercări

Caracteristicile şi performanţele sistemelor de izolaţie ale maşinilor şi echipamentelor electrice depind foarte mult atât de proprietăţile individuale ale fiecărui material electroizolant component, cât şi de interacţiunile care se stabilesc între aceste materiale. În practică, proprietăţile electrice, mecanice, termice, ş.a. ale materialelor electroizolante se stabilesc în urma efectuării unor *încercări convenţionale*. Dintre acestea, încercările efectuate pentru determinarea proprietăţilor electrice sunt cele mai numeroase şi mai des întâlnite. Astfel, în mod uzual, sunt determinate rezistivitatea (sau rezistenţa de izolaţie), permitivitatea relativă (sau capacitatea), factorul de pierderi şi rigiditatea dielectrică (sau tensiunea de străpungere). În practică, pentru efectuarea acestor încercări sunt utilizate metode care folosesc atât tensiune continuă cât şi tensiune alternativă [3, 28].

Sistemele de izolaţie complexe, care conţin mai multe componente, sunt supuse unor *încercări funcţionale*. Acestea vizează stabilirea gradului de compatibilitate între materialele alese şi corectitudinea realizării sistemului de izolaţie în raport cu tipul solicitărilor la care va fi supus. Există două categorii de încercări funcţionale:

- încercări care au în vedere controlul dimensionării;
- încercări de simulare a condiţiilor din exploatarea reală.

Din punct de vedere al consecinţelor produse asupra izolaţiilor,

există două clase mari de încercări:

- *încercări nedistructive*, în urma cărora starea materialelor electroizolante nu este alterată;
- *încercări distructive*, ca de exemplu încercările mecanice, determinarea rigidității dielectrice sau a tensiunii de străpungere, etc. care conduc la distrugerea parțială sau totală a izolațiilor încercate.

Datorită solicitărilor la care sunt supuse sistemele de izolație îmbătrânesc și unele caracteristici de bază se modifică în timp. În marea majoritate a cazurilor, încercările nedistructive au ca scop evaluarea stării de îmbătrânire a sistemelor de izolație fără însă a perturba exploatarea acestora. Scopul acestor încercări nu este însă acela de a determina valorile proprietăților reprezentative la un moment dat ci de a stabili variația acestora în timp.

Unele dintre cele mai importante obiective avute în vedere de producătorii și utilizatorii de echipamente electrice se referă la găsirea unor metode eficiente pentru determinarea duratei de viață a sistemelor de izolație noi, diagnosticarea stării sistemelor de izolație aflate în exploatare și evaluarea rezervei de durată de viață a acestora.

În cele ce urmează se vor prezenta principalele grupe de încercări la care sunt supuse materialele electroizolante și sistemele de izolație complexe cât și metodele folosite în practică pentru evaluarea stării sistemelor de izolație.

5.1.1.1. Încercări de control al dimensionării

Aceste încercări sunt efectuate pentru fiecare tip de echipament în parte. Scopul lor este acela de a verifica nivelul solicitărilor în serviciu, aplicate efectiv izolației, în raport cu valorile considerate în faza de proiectare. În general, pentru proiectarea sistemelor de izolație complexe, valorile solicitărilor sunt alese în concordanță cu rezultatele obținute în urma încercărilor preliminare, efectuate pe materialele electroizolante componente. În anumite situații, valorile maxime ale solicitărilor sunt impuse prin datele de proiectare (mai cu seamă în ceea ce privește valoarea temperaturii).

Deoarece, datorită complexității, modelele de calcul folosite în faza

de proiectare a echipamentelor electrice nu iau în considerare totalitatea fenomenelor care au loc în sistemele de izolaţie, încercările de control a dimensionării sunt obligatorii.

5.1.1.2. Încercări de simulare a condiţiilor de funcţionare

Aceste încercări vizează stabilirea modului în care sistemele de izolaţie se comportă în timp la acţiunea solicitărilor caracteristice funcţionării normale sau anormale a echipamentelor electrice. Deoarece încercările efectuate pe echipamente sau pe părţi ale echipamentelor sunt costisitoare, foarte adesea sunt utilizate modele de studiu simplificate.

Încercările de simulare a condiţiilor de funcţionare pot fi atât distructive cât şi nedistructive. Încercările distructive permit evaluarea intervalului de siguranţă, în aceste cazuri fiind aplicate solicitări superioare valorilor maxime întâlnite în exploatare.

a) Simularea condiţiilor de funcţionare normală

Performanţele sistemelor de izolaţie sunt evaluate pe baza experienţei în serviciu sau cu ajutorul unor încercări de laborator care simulează condiţiile de funcţionare normală. Cum în cazul izolaţiilor noi, experienţa din exploatare lipseşte, singura modalitate de evaluare a performanţelor se bazează pe efectuarea unor încercări de laborator. În acest sens, unul dintre punctele cele mai sensibile care intervin în evaluarea caracteristicilor sistemelor de izolaţie se referă la cuantificarea efectelor pe care solicitările de lungă durată le produc asupra izolaţiilor, pe baza unor încercări desfăşurate în intervale de timp scurte comparativ cu durata de viaţă obişnuită a echipamentelor electrice. Aceste încercări, numite *încercări accelerate*, sunt prin natura lor nereprezentative deoarece singura posibilitate de micşorare semnificativă a duratei de viaţă a izolaţiilor constă în creşterea intensităţii solicitărilor. În cadrul acestor încercări, nu se modifică numai viteza de îmbătrânire a izolaţiei, ci pot fi create condiţii pentru apariţia unor fenomene noi, care nu se manifestă în funcţionarea normală a echipamentului [13].

Interpretarea rezultatelor obţinute în urma încercărilor accelerate de laborator necesită cunoaşterea proceselor de degradare care se manifestă pe

durata încercărilor. O astfel de evaluarea a performanțelor unui sistem de izolație trebuie să arate dacă sistemul de izolație satisface cerințele din exploatare, exprimate prin factorii de influență, modul de funcționare a echipamentului, etc.

b) Simularea condițiilor de funcționare anormală

Mașinile și celelalte echipamente electrice au în anumite situații funcționări anormale, în sensul că solicitările la care sunt supuse anumite componente (inclusiv izolația) sunt diferite de cele caracteristice regimului normal de funcționare. În general, evaluarea intensității și frecvenței acestor solicitări excepționale care intervin în exploatare este deosebit de dificilă.

Există mai multe categorii de solicitări excepționale la care sunt supuse sistemele de izolație, dintre care cele mai importante sunt supratensiunile, solicitările electrodinamice, comportarea la foc, etc.

Supratensiunile care intervin în funcționarea echipamentelor electrice sunt de două feluri:

- *supratensiuni interne* (sau *de comutație*) care au o durata mică (sute sau mii de microsecunde);
- *supratensiunile externe* care, datorită originii lor se mai numesc și *supratensiuni atmosferice*.

Cele mai periculoase supratensiuni de comutație apar în cazul punerii la pământ, a deconectării curenților mici inductivi și capacitivi și la deconectarea echipamentelor aflate în sarcină. Supratensiunile atmosferice sunt independente de tensiunea nominală a echipamentului și de tipul acestuia. Ele sunt provocate de loviturile directe sau indirecte de trăsnet. În cea mai mare parte, echipamentele electrice sunt dotate cu dispozitive de protecție la supratensiuni atmosferice. Prin urmare, sistemele de izolație sunt solicitate la supratensiuni care, cel puțin teoretic, nu depășesc nivelul asigurat de mijloacele de protecție. Totuși, în cazul anumitor echipamente, ca de exemplu cele care conțin bobine, se por produce fenomene de reflexie a undelor de tensiune și pot să apară oscilații datorită cărora tensiunea la borne depășește nivelul de protecție. Din acest motiv, printre altele, sistemele de izolație ale echipamentelor electrice sunt încercate în laborator la tensiuni care depășesc nivelul de protecție și anume, la tensiuni

corespunzătoare *nivelului de ţinere*. Tensiunile de ţinere sunt determinate conform standardelor pentru fiecare tip de echipament în parte în funcţie de valoarea tensiunii nominale.

Solicitările electrodinamice apar mai cu seamă în cazul maşinilor electrice de puteri mari şi au intensităţii foarte mari mai cu seamă în cazul apariţiei curenţilor de scurtcircuit. Aceste solicitări exercitate asupra sistemelor de izolaţie pot fi reproduse foarte bine în laborator cu ajutorul unor mijloace adecvate pentru exercitarea unor eforturi de compresiune, încovoiere, alungire, etc.

În ceea ce priveşte comportarea la foc a izolaţiilor, încercările efectuate în laborator au în vedere următoarele aspecte:

- măsura în care izolaţia constituie o sursă de incendiu;
- evaluarea vitezei de combustie;
- natura gazelor care se elimină atunci când se produce combustia izolaţiei.

Încercările cele mai utilizate se referă la inflamabilitate, indicele de oxigen (care reprezintă procentul de oxigen necesar pentru aprinderea şi întreţinerea arderii izolaţiei), viteza de ardere, puterea calorică, etc.

5.2. Determinarea duratei de viaţă a sistemelor de izolaţie

Încercările accelerate realizate în laborator permit estimarea duratei de viaţă a sistemelor de izolaţie. Pentru aceasta, se determină variaţia în timp a uneia sau a mai multor proprietăţi atunci când sistemul de izolaţie este supus solicitărilor. În acest caz, durata de viaţă a unui sistem de izolaţie se defineşte ca fiind intervalul de timp în care, sub acţiunea solicitărilor, valoarea uneia dintre proprietăţile izolaţiei se modifică dincolo de o valoare limită numită *criteriu de sfârşit de viaţă*. Cel mai adesea, se determină durata de viaţă sau *anduranţa* unei izolaţii supusă unui singur tip de solicitări: termice, electrice, mecanice, radiative, etc. Alegerea criteriului de sfârşit de viaţă se face în conformitate cu standardele aflate în vigoare în funcţie de natura izolaţiei şi tipul solicitării.

5.2.1. Determinarea duratei de viaţă termică

Primele studii referitoare la determinarea duratei de viaţă a izolaţiilor supuse la solicitări termice au fost efectuate acum aproape un secol de *Montsinger* [38]. Acesta a urmărit reducerea proprietăţilor mecanice ale hârtiilor impregnate cu uleiuri minerale în funcţie de temperatură şi, pe baza rezultatelor obţinute, a propus următoarea expresie de calcul a duratei de viaţă:

$$D_t = C\exp(B/T), \tag{5.1}$$

în care D_t este durata de viaţă a izolaţiei corespunzătoare temperaturii T, C şi b sunt constante de material şi θ reprezintă temperatura exprimată în grade Celsius.

În general, se consideră că degradarea sistemelor de izolaţie sub acţiunea solicitărilor termice se produce datorită unor reacţii chimice a căror viteză caracteristică v_R variază cu temperatura după legea lui *Arrhenius*:

$$v_R = v_0 \exp\left(-\frac{W}{RT}\right), \tag{5.2}$$

în care v_0 este o constantă, W este energia de activare măsurată în Joule/mol, R este constanta gazelor şi T temperatura termodinamică [13].

Dacă, de exemplu, se consideră că îmbătrânirea izolaţiei este datorată unei singure reacţii chimice a cărei viteză depinde de concentraţia moleculelor c care reacţionează, viteza de variaţie a concentraţiei poate fi aproximată printr-o funcţie $f(c)$ conform relaţiei:

$$\frac{dc}{dt} = v_R f(c), \tag{5.3}$$

rezultând $f(c)dc = v_R dt$, ceea ce prin integrare conduce la o funcţie $g(c) = v_R t$. Dacă o proprietate oarecare P a izolaţiei variază cu concentraţia de molecule după expresia $P = h(c)$, respectiv $c = h_1(P)$, rezultă, în final $F(P) = v_R t$. Notând cu P_0 valoarea proprietăţii P corespunzătoare unei durate de viaţă D_t a sistemului de izolaţie (cu alte cuvinte, considerând criteriul de sfârşit de viaţă $P = P_0$), rezultă:

$$F(P_0) = v_a D_t = v_0 D_t \exp\left(-\frac{W}{RT}\right). \tag{5.4}$$

Notând $\ln \frac{F(P_0)}{v_0} = A$ şi $\frac{W}{R} = B$, relaţia de calcul a duratei de viaţă devine:

$$\ln D_t = A + \frac{B}{T}. \tag{5.5}$$

Menţionăm că relaţia (5.5), dedusă pe baza legii lui *Arrhenius*, este valabilă dacă în timpul procesului de îmbătrânire energia de activare W nu se modifică. Expresia (5.5) este general utilizată pentru calculul duratei de viaţă termice, oricare ar fi mecanismele de degradare existente în cazul sistemelor de izolaţie.

În practică, pentru fiecare temperatură de încercare sunt determinate constantele A şi B. Standardele aflate în vigoare referitoare la metodele de încercare la îmbătrânire recomandă efectuarea de măsurători la cel puţin trei valori ale temperaturii.

Determinarea experimentală a duratei de viaţă a unei izolaţii presupune studiul variaţiei unei proprietăţi electrice, mecanice sau chimice a izolaţiei pe parcursul procesului de îmbătrânire termică. Astfel, sunt trasate curbele de variaţie ale proprietăţii alese în funcţie de timp, pentru fiecare valoare a temperaturii, şi se determină intersecţiile acestor curbe cu dreapta orizontală corespunzătoare criteriului de sfârşit de viaţă ales (fig. 5.1). Prin metoda grafică sunt determinate coordonatele punctelor de intersecţie $P_1(T_1, \tau_1)$, $P_2(T_2, \tau_2)$, şi $P_3(T_3, \tau_3)$ pe baza cărora se trasează curba duratei de viaţă termice în coordonate semilogaritmice $x = 1/T$ şi $y = \ln \tau$ (fig. 5.2). Avantajul acestui mod de reprezentare constă în faptul că trasarea curbei se poate face în principiu din două determinări şi extrapolarea până la temperaturi de regim este mai uşoară.

Deşi dependenţa dintre durata de viaţă a izolaţiei şi temperatură se poate descrie, la o parte importantă a izolaţiilor, cu ajutorul relaţiei (5.5), menţionăm însă că există numeroase cazuri în care curba duratei de viaţă nu este liniară nici chiar în sistemul de coordonate semilogaritmic. Motivul constă în existenţa mai multor reacţii chimice care împreună determină

modificarea proprietăților sistemelor de izolație.

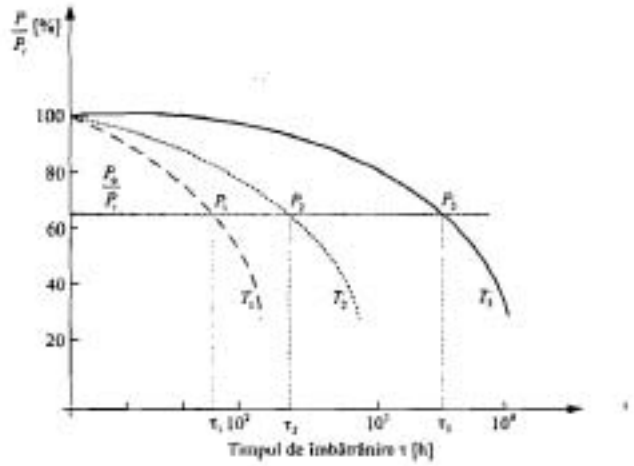


Fig. 5.1. Curbe de îmbătrânire termică accelerată.

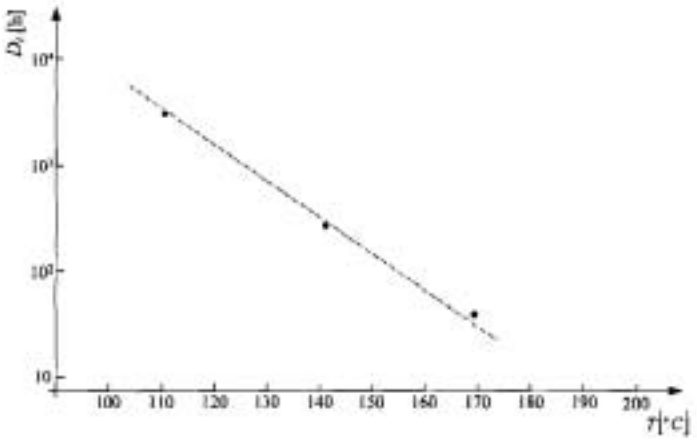


Fig. 5.2. Dreapta duratei de viață trasată pe baza punctelor $P_1(T_1, \tau_1)$, $P_2(T_2, \tau_2)$, și $P_3(T_3, \tau_3)$ obținute în fig. 5.1.

Pe baza curbelor duratei de viață termice determinate experimental în condiții standardizate, materialele au fost împărțite în *clasele de izolație* descrise în primul capitol al lucrării. Criteriul de bază ales a fost durata de viață minimă (de exemplu 25000 de ore) pe care materialele electroizolante o au la temperatura de regim. Pentru exemplificare, considerăm dreptele duratelor de viață termică a trei materialele electroizolante (fig. 5.3).

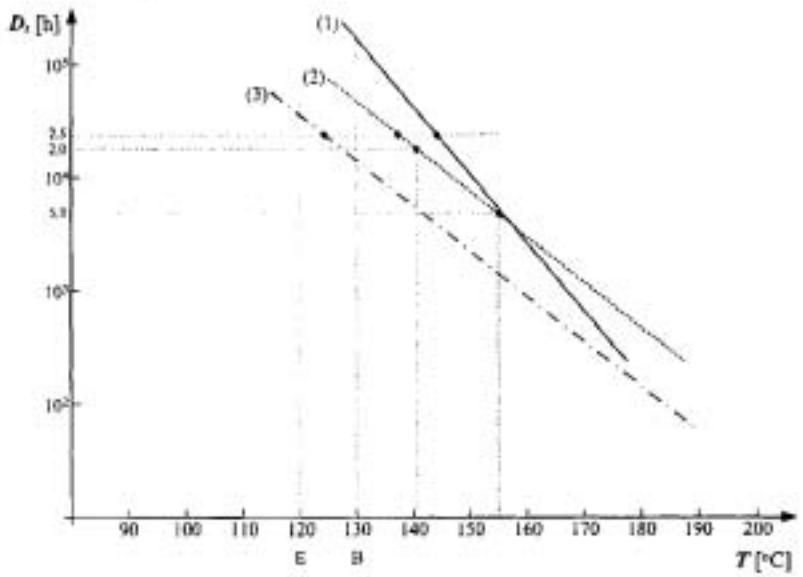


Fig. 5.3. Explicativă pentru stabilirea claselor de izolaţie după stabilitatea termică pe baza dreptelor de durata de viaţă.

Examinând dreptele din fig. 5.3 se constată că în cazul materialelor (1) şi (2), durata de viaţă termică depăşeşte 25000 h la o temperatură de regim de 130 °C şi prin urmare acestea sunt plasate în clasa de izolaţie *B*. În schimb, se observă că durata de viaţă a materialului (3) la $T = 130$ °C nu atinge valoarea minimă de 25000 h şi, prin urmare, acesta este plasat în clasa de izolaţie *E*.

Aşa cum a fost menţionat în primul capitol este dificil ca sistemele de izolaţie complexe să fie plasate în clasele de izolaţie tradiţionale. Mai mult, împărţirea materialelor electroizolante în clase de izolaţie nu dă posibilitatea diferenţierii calitative a acestora, datorită treptelor relativ mari de temperatură între valorile atribuite fiecărei clase. Pentru eliminarea acestui neajuns, *Comitetul Electrotehnic Internaţional* a introdus ulterior sistemul de caracterizare a materialelor în funcţie de *indicele de temperatură* (acea valoare a temperaturii pentru care durata de viaţă a izolaţiei este nominală (de exemplu, 20000 de ore) [5]. Indicele de temperatură se determină din dreapta duratei de viaţă termică obţinută ca şi mai sus. De exemplu, conform fig. 5.3, indicele de temperatură al materialului (2) este TI/141 (TI - „temperature index"). Uneori se utilizează

o formă de notare mai exactă care conține și durata de viață în „kiloore" (kh) a izolației. Pentru același exemplu considerat mai sus, indicele de temperatură se scrie TI 20 kh/141.

Utilizarea indicilor de temperatură are totuși și anumite neajunsuri, printre care acela că permite caracterizarea duratei de viață într-un singur punct de funcționare. Înlăturarea acestui inconvenient a fost posibilă prin introducerea noțiunii de profil de anduranță termică TEP (*„thermal endurance profil"*) care definește curba duratei de viață termică prin două puncte și anume temperaturile de regim la 20000, respectiv la 5000 de ore. De asemenea, conform acestei metode de caracterizare a proprietăților termice ale materialelor, trebuie specificată și temperatura de regim corespunzătoare limitei inferioare de încredere de 95% pentru durata de viață egală cu 5000 de ore. Profilul de anduranță termică (TEP) sau stabilitatea termică a izolației considerate în exemplul de mai sus (fig. 5.3), se poate scrie TEP 141/155 (151), în care 141 și 155 reprezintă temperaturile de regim exprimate în °C referitoare la duratele de viață de 20000, respectiv 5000 de ore, iar 151 este valoarea temperaturii de regim exprimată în grade Celsius corespunzătoare limitei inferioare de încredere (95%).

Totodată, nu trebuie pierdut din vedere că în timpul exploatării, temperatura izolației variază, putând fi identificate trepte de temperaturi diferite. Prin urmare, durata de viață totală se calculează ca fiind suma duratelor de viață parțiale, calculate pentru fiecare treaptă de temperatură.

În cele ce urmează se va descrie modul de calcul al parametrilor ce caracterizează procesul de îmbătrânire a izolațiilor electrice. În general, în cazul regimurilor termice variabile (variațiile de temperatură ale izolației), se alege o temperatură de bază T_b, corespunzătoare unei durate de viață D_b determinată experimental. Dacă temperatura izolației ar fi constantă și egală cu T_b, atunci raportul dintre timpul de funcționare și durata de viață D_b ar crește uniform și în intervalul de timp $t = D_b$ ar atinge valoarea sa maximă egală cu unitatea. În acest timp se consumă o parte a duratei nominale a vieții izolației [3]:

$$r = \frac{\Delta D}{D_b} = \frac{t}{D_b}, \tag{5.6}$$

în care r se numeşte *durată de viaţă relativă consumată* sau *uzura termică relativă* a izolaţiei. Durata de viaţă consumată raportată la unitatea de timp (1 h) caracterizează *viteza de îmbătrânire* a izolaţiei. Astfel, pentru caracterizarea proceselor de îmbătrânire se utilizează noţiunea de *viteză relativă de îmbătrânire* exprimată prin relaţia [3]:

$$v_{imb} = \frac{r}{t} = D_b^{-1}. \tag{5.7}$$

Viteza relativă de îmbătrânire definită cu ajutorul relaţiei (5.7) se referă la temperatura de bază T_b. Pentru o altă valoare a temperaturii T se consideră durata de viaţă $D_t(T)$, şi ţinând cont de relaţia (5.5), rezultă:

$$v_{imb}(T) = D_t(T)^{-1} = A' \exp\left(\frac{B}{T}\right), \tag{5.8}$$

în care A' este o constantă care se determină din curba duratei de viaţă a izolaţiei. Dependenţa vitezei relative de îmbătrânire de temperatura izolaţiei în sistemul de coordonate $\log T$ şi $1/T$ este o dreaptă ca şi în cazul duratei de viaţă.

Din expresiile (5.7) şi (5.8) rezultă că pentru orice valoare a temperaturii, durata de viaţă relativă consumată se poate calcula cu relaţia:

$$r(T) = v_{imb}(T) \cdot t. \tag{5.9}$$

Dacă izolaţia funcţionează pe mai multe trepte de temperatură, cu ajutorul relaţiei (5.9) se poate determina uzura termică relativă pentru fiecare treaptă iar durata de viaţă totală consumată se obţine prin însumarea valorilor pe fiecare interval.

În cazul în care temperatura izolaţiei şi cu aceasta şi viteza de îmbătrânire a izolaţiei se supune unei legi de variaţie continue $T = \zeta(t)$, atunci consumul relativ al duratei de viaţă se calculează prin integrare:

$$r = \int_{T_0}^{T} v_{imb}(T)dT = \int_{0}^{T} v_{imb}(t)dt. \tag{5.10}$$

Integrarea relaţiei (5.10), chiar şi în condiţiile unei variaţii continue a temperaturii, conduce la expresii matematice complexe, motiv pentru care, în practică, variaţia temperaturii între două valori T' şi T'' se consideră liniară. În astfel de cazuri, temperatura de bază T_b poate să fie chiar una dintre cele două temperaturi limită.

Considerând variaţia liniară a temperaturii, într-un interval de timp Δt, unei valori de referinţă T^* a temperaturii îi corespunde o durată de viaţă echivalentă t' calculată cu relaţia [3]:

$$t' = \frac{B}{T''-T'}\left(k'' e^{u'-u^*} - k'\right)\Delta t\,, \tag{5.11}$$

în care $u' = B/T'$, $u'' = B/T''$ şi valorile coeficienţilor k' şi k'' se obţin din tabele în funcţie de valorile lui u. Consumul relativ al duratei de viaţă, considerând variaţia liniară a temperaturii, va fi:

$$r = v'_{imb} \cdot t'\,, \tag{5.12}$$

în care v'_{imb} reprezintă viteza de îmbătrânire a izolaţiei la temperatura T'.

5.2.1.1. Aplicaţie numerică. Calculul mărimilor caracteristice procesului de îmbătrânire a izolaţiei unui transformator

Pentru a exemplifica modul de calcul al mărimilor caracteristice proceselor de îmbătrânire a izolaţiei echipamentelor electrice se consideră cazul unui sistem de izolaţie hârtie – ulei, care intră în componenţa unui transformator de putere. Pentru efectuarea calculelor se va utiliza profilul de anduranţă termică al izolaţiei hârtie-ulei TEP 92/107 (105), ceea ce înseamnă că valorile temperaturii pentru care durata de viaţă termică a izolaţiei atinge 20000 h, respectiv 5000 h sunt de 92 °C, respectiv 107 °C (fig. 5.4).

Calculul uzurii termice a izolaţiei se va face ţinând cont de faptul că temperatura de funcţionare a transformatorului variază în funcţie de încărcarea acestuia. Pentru aceasta considerăm diagrama zilnică simplificată reprezentată în fig. 5.5, care ţine cont de vârfurile de sarcină existente în intervalele orare 5 - 8, respectiv 18 – 21. Se constată că, pe parcursul unei

zile, diagrama temperaturii este alcătuită din şase intervale în care temperatura variază liniar (2,4,5 şi 6) sau este constantă (1 şi 3).

În vederea determinării uzurii termice a izolaţiei în fiecare zi de funcţionare a transformatorului (pe parcursul a 24 de ore), trebuie să se calculeze consumul relativ al duratei de viaţă Δr pe fiecare interval de temperatură:

$$r_{zi} = \sum_{i=1}^{6} \Delta r_i \,. \tag{5.13}$$

În intervalul 1 cu durata $\Delta t_1 = 6$ h, temperatura izolaţiei este $T_1 = 343$ K. Viteza relativă de îmbătrânire în acest interval se poate calcula conform relaţiei (5.7) determinând grafic, din dreapta duratei de viaţă termice, durata de viaţă corespunzătoare temperaturii din intervalul 1:

$$v_{imb}(T_1) = \left(1{,}7 \cdot 10^5\right)^{-1} = 5{,}7 \cdot 10^{-6}\ h^{-1}, \tag{5.14}$$

rezultând, în acest fel, îmbătrânirea relativă corespunzătoare intervalului 1 $\Delta r_1 = v_{imb}(T_1) \cdot \Delta t_1 = 5{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 6 = 3{,}42 \cdot 10^{-5}$.

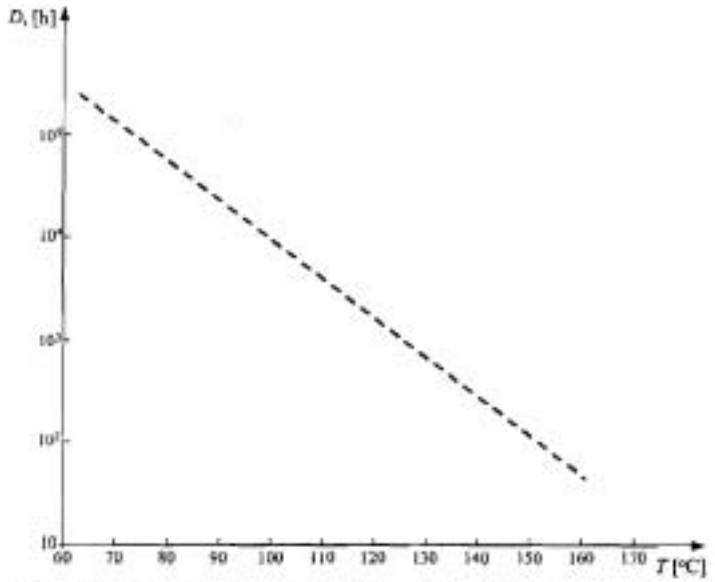


Fig. 5.4. Dreapta duratei de viaţă a izolaţiei hârtie - ulei [3].

În intervalul 2 cu durata $\Delta t_2 = 2$ h, temperatura izolației crește de la $T_1 = 343$ K la $T_2 = 363$ K. În acest caz, durata de îmbătrânire echivalentă t_2' se determină cu ajutorul relației (5.11), alegând ca temperatură de bază $T_1 = 343$ K. Scriind ecuația (5.1) pentru cele două valori ale temperaturii

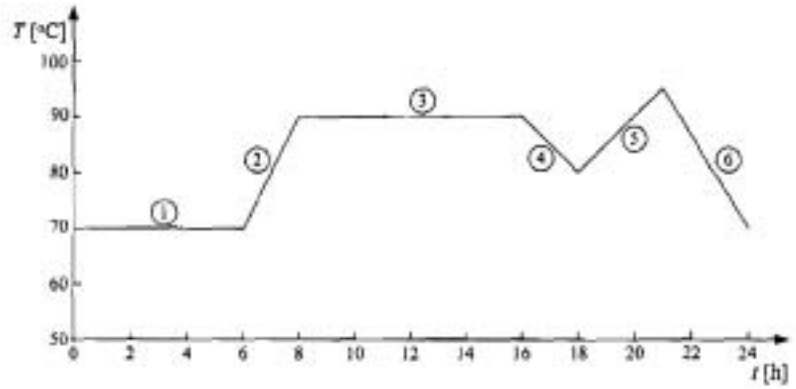


Fig. 5.5. Forma simplificată a diagramei temperaturii de funcționare a unui transformator de putere.

care definesc intervalul, prin împărțire se obține:

$$\frac{D_i(T_1)}{D_i(T_2)} = \exp\left[B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right], \tag{5.15}$$

din care rezultă valoarea constantei B:

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{D_i(T_1)}{D_i(T_2)} = \frac{343 \cdot 363}{343 - 363} \ln \frac{1{,}7 \cdot 10^5}{2{,}2 \cdot 10^4} \tag{5.16}$$
$$= 1{,}27 \cdot 10^4 \text{ K}.$$

Cunoscând valoarea constantei B și limitele de temperatură ale intervalului, rezultă $u' = B/T_1 = 37{,}11$, respectiv $u'' = B/T_2 = 35{,}1$. Conform datelor din literatură [3], pentru $u' = 37{,}11$ rezultă $k' = 6{,}92 \cdot 10^{-4}$, respectiv, pentru $u'' = 35$ rezultă $k'' = 7{,}74 \cdot 10^{-4}$. Durata de îmbătrânire echivalentă t_2' este:

$$t_2' = \frac{B}{T_2 - T_1}\left(k'' e^{u''-u'} - k'\right)\Delta t_2$$
$$= \frac{2 \cdot 1{,}27 \cdot 10^4}{363 - 343} \cdot \left[7{,}74 \cdot 10^{-4} \exp(37{,}11 - 35) - 6{,}92 \cdot 10^{-4}\right] \quad (5.17)$$
$$= 7{,}22\,\text{h}.$$

Cum pentru intervalul 2 s-a ales ca temperatură de bază $T_1 = 343$ K, viteza de îmbătrânire este egală cu cea din intervalul 1, $v_{imb}(T_1)$ calculată cu relaţia (5.14) şi prin urmare, uzura termică relativă a izolaţiei pe durata Δt_2 este:

$$\Delta r_2 = v_{imb}(T_1) \cdot t_2' = 5{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot 7{,}22 = 4{,}1 \cdot 10^{-5}. \quad (5.18)$$

Pentru celelalte patru intervale din diagrama zilnică de variaţie a temperaturii de funcţionare, se procedează în mod analog. Datele obţinute sunt prezentate în tabelul 5.1.

Tabel 5.1. Valorile mărimilor caracteristice procesului de îmbătrânire a izolaţiei hârtie – ulei.

Mărime	Intervalul 3	Intervalul 4	Intervalul 5	Intervalul 6
v_{imb} [h^{-1}]	$4{,}5 \cdot 10^{-5}$	$4{,}5 \cdot 10^{-5}$	$1{,}66 \cdot 10^{-5}$	$7{,}1 \cdot 10^{-5}$
t [h]	-	0,985	6,4	1,13
Δr	$3{,}64 \cdot 10^{-4}$	$4{,}43 \cdot 10^{-5}$	$1{,}06 \cdot 10^{-4}$	$8{,}02 \cdot 10^{-5}$

Din relaţia (5.13) rezultă că uzura termică relativă a izolaţiei corespunzătoare unei zile de funcţionare r_{zi}, pe parcursul căreia temperatura variază conform diagramei din fig. 5.5 este:

$$r_{zi} = \sum_{i=1}^{6} \Delta r_i = 3{,}42 \cdot 10^{-5} + 4{,}1 \cdot 10^{-5} + 36{,}4 \cdot 10^{-5} + 4{,}43 \cdot 10^{-5} + 10{,}6 \cdot 10^{-5} + +8{,}02 \cdot 10^{-5} \quad (5.19)$$
$$= 6{,}7 \cdot 10^{-4}\,\text{h}.$$

Viteza medie zilnică de îmbătrânire se calculează:

$$\langle v_{imb} \rangle_{zi} = \frac{6{,}7 \cdot 10^{-4}}{24} = 2{,}79 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{h}^{-1}. \qquad (5.20)$$

Utilizând relațiile (5.1), (5.12) și (5.16) și determinând constanta $C = 1{,}41 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{h}$, se obține temperatura medie echivalentă de regim T_e corespunzătoare vitezei medii zilnice de îmbătrânire:

$$T_e = \frac{B}{\ln \frac{\langle v_{imb} \rangle_{zi}^{-1}}{C}} = \frac{1{,}27 \cdot 10^4}{\ln \frac{\left(2{,}79 \cdot 10^{-5}\right)^{-1}}{1{,}41 \cdot 10^{-11}}} = 358\ \mathrm{K}. \qquad (5.21)$$

Prin urmare, rezultă că sistemul de izolație al transformatorului a cărei temperatură variază în decursul unei zile conform diagramei simplificate din fig. 5.5, îmbătrânește termic ca și cum ar funcționa la o temperatură constantă T_e = 85°C. Durata de viață a izolației supusă solicitărilor termice variabile în timp se poate calcula cu relația (5.1):

$$D_t = C \cdot \exp\left(\frac{B}{T_e}\right) = 1{,}41 \cdot 10^{-11} \cdot \exp\left(\frac{1{,}27 \cdot 10^4}{358}\right) = 3{,}6 \cdot 10^4\ \mathrm{h} = 4{,}1\ \mathrm{ani}. \qquad (5.22)$$

5.2.2. Determinarea duratei de viață electrică

Determinarea duratei de viață a sistemelor de izolație supuse numai solicitărilor electrice se poate face, în funcție de natura izolației, cu ajutorul a două relații de calcul empirice. În cazul izolațiilor termoplastice (polimerilor), se utilizează o relație polinomială, numită și *legea puterii*, care are următoarea formă [13]:

$$D_e = C \cdot E^{-n}, \qquad (5.22)$$

în care D_e reprezintă durata de viață electrică, C și n sunt constante de material determinate pe cale experimentală și E este intensitatea câmpului electric care se exercită asupra izolației.

Pentru izolaţiile termorigide se foloseşte o altă relaţie numită *legea exponenţială* care are forma [13]:

$$D_t = C' \exp(-n'E), \tag{5.23}$$

în care C' şi n' sunt, ca şi în cazul izolaţiilor termoplastice, constante de material.

Influenţa câmpului electric asupra îmbătrânirii sistemelor de izolaţie este sensibil mai mică, comparativ cu cea a temperaturii. Totuşi, în cazul anumitor izolaţii, îmbătrânirea electrică poate fi sesizată. Câmpul electric influenţează în mod direct sau indirect îmbătrânirea izolaţiei, datorită descărcărilor parţiale, arborescenţelor electrice şi electrochimice, etc.

5.2.3. Determinarea duratei de viaţă mecanică

Pentru determinarea duratei de viaţă a sistemelor de izolaţie supuse solicitărilor mecanice sunt utilizate expresii asemănătoare cu (5.23). De exemplu, pentru o izolaţie supusă la încovoiere, relaţia de calcul pentru durata de viaţă este [13]:

$$D_m = C_m \exp(-m\sigma), \tag{5.24}$$

în care D_m este durata de viaţă corespunzătoare solicitărilor mecanice singulare, C_m şi m sunt constante de material determinate experimental şi σ reprezintă efortul unitar la încovoiere.

Studiile efectuate până în prezent au arătat că efectele solicitărilor mecanice asupra fenomenului de îmbătrânire a izolaţiilor este foarte greu de cuantificat. Prin urmare, determinarea duratei de viaţă mecanică prezintă dificultăţi majore şi este posibilă numai în cazul unui număr foarte restrâns de materiale electroizolante.

5.2.4. Determinarea duratei de viaţă în cazul solicitărilor combinate

Durata de viaţă a unui sistem de izolaţie este determinată de totalitatea solicitărilor care se exercită pe durata funcţionării. Expresiile

prezentate mai sus permit estimarea duratei de viață în cazul în care izolațiile sunt supuse unui singur tip de solicitări. Dacă însă asupra unui sistem de izolație se exercită simultan solicitările descrise mai sus, durata de viață se calculează cu ajutorul relației [13]:

$$\frac{1}{D} = \frac{s_T}{D_T} + \frac{s_e}{D_e} + \frac{s_m}{D_m}, \tag{5.25}$$

în care D reprezintă durata de viață a izolației supusă acțiunii simultane a solicitărilor termice, electrice și mecanice și s_T, s_e și s_m sunt coeficienți de sinergism care se determină experimental.

6. DIAGNOSTICAREA STĂRILOR SISTEMELOR DE IZOLAŢIE

6.1. Noţiuni generale

Regimul normal de funcţionare a maşinilor şi echipamentelor electrice este condiţionat, printre altele, de starea sistemelor de izolaţie. Prin urmare, atât în cazul echipamentelor noi, dar mai ales în cazul celor aflate în exploatare, diagnosticarea stării sistemelor de izolaţie constituie un punct deosebit de important.

Pentru echipamentele electrice noi, starea izolaţiei este evaluată, de la caz la caz, după anumite etape ale procesului de fabricaţie, după operaţiunile de montaj şi înainte de punerea în funcţiune a echipamentelor. Evaluarea stării izolaţiilor se realizează pe baza unor încercări care presupun determinarea unor parametrii ale căror valori depind direct de starea sistemelor de izolaţie.

Izolaţiile maşinilor şi echipamentelor aflate în exploatare sunt supuse permanent solicitărilor electrice, termice sau de alt tip, ceea ce determină apariţia procesului de îmbătrânire. Înrăutăţirea proprietăţilor sistemelor de izolaţie conduce, în foarte multe cazuri, la defectarea echipamentelor. În acest sens, amintim că, în conformitate cu datele prezentate în capitolul 1 (§1.4.2), peste jumătate dintre cauzele care determină scoatere din folosinţă a maşinilor electrice sunt datorate defectelor de izolaţie. Prin urmare, pentru evitarea apariţiei avariilor este necesară cunoaşterea stării izolaţiilor şi, acolo unde este posibil, evaluarea rezervei de durată de viaţă. Acest lucru se realizează pe baza unor încercări profilactice, nedistructive, cu ajutorul cărora sunt determinate anumite mărimi sau variaţiile în timp ale acestora.

În capitolul de faţă sunt prezentate unele aspecte de bază referitoare la determinarea stării sistemelor de izolaţie pe baza examinării unor *factori de diagnostic*, care pot fi, atât parametri de funcţionare ai maşinilor şi echipamentelor electrice, cât şi mărimi caracteristice ale izolaţiilor. Tendinţa

actuală este aceea de a dezvolta sisteme complete de monitorizare – diagnosticare capabile să efectueze măsurători şi să memoreze valorile factorilor de diagnostic şi, pe baza acestora, să ofere informaţii referitoare la starea sistemelor de izolaţie. Elaborarea şi utilizarea eficientă a unor astfel de sisteme inteligente necesită însă cunoaşterea legăturilor care există între valoarea factorilor de diagnostic, solicitările la care este supusă izolaţia şi procesul de îmbătrânire a acesteia.

Evaluarea cât mai exactă a stării izolaţiei unui echipament electric presupune, în primul rând, măsurarea unor parametrii care să permită interpretarea cât mai clară şi precisă a datelor obţinute. Deşi factorii de diagnostic pot să difere de la o categorie de echipamente la alta, în marea majoritate aceştia sunt reprezentaţi de mărimi de natură electrică şi numai în anumite cazuri sunt mărimi neelectrice.

Experienţa dobândită în timp de constructorii şi utilizatorii de echipamente electrice cât şi posibilităţile tehnice existente permit, în general, efectuarea unor încercări profilactice amănunţite şi foarte precise. Interpretarea corectă a rezultatelor acestor încercări conduce la depistarea eventualelor defecte ale izolaţiei şi a felului în care acestea evoluează în timp. Pe baza datelor obţinute se decide dacă echipamentul în cauză este păstrat în funcţiune sau se stabileşte tipul şi data reparaţiilor necesare.

6.2. Metode şi factori de diagnostic

Cele mai numeroase metode de diagnosticare a stărilor sistemelor de izolaţie utilizează factori de diagnostic electrici (mărimi electrice), însă există şi metode care au la bază factori de diagnostic neelectrici (mărimi neelectrice).

O metodă de diagnosticare aparte constă în examinarea vizuală a izolaţiei. Deşi în aparenţă aceasta pare a fi o metodă simplă, în realitate, examinarea vizuală permite evidenţierea unor defecte tehnologice de suprafaţă, a degradării izolaţiilor, a punctelor în care temperatura prezintă valori ridicate, a uzurii mecanice prin frecare sau strivire, etc.

6.2.1. Măsurarea parametrilor electrici

Printre mărimile electrice utilizate pentru diagnosticarea stărilor sistemelor de izolaţie, cele mai uzuale sunt: rezistenţa de izolaţie, permitivitatea relativă, factorul de pierderi, capacitatea electrică, rezistivitatea, rigiditatea dielectrică, indicele de polarizare şi nivelul descărcărilor parţiale.

6.2.1.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie

Măsurarea rezistenţei de izolaţie este cea mai simplă şi mai utilizată metodă pentru aprecierea stării generale a unei izolaţii. Aceasta se determină fie pentru întreg sistemul de izolaţie, fie pentru anumite părţi componente ale acestuia. Deoarece starea sistemelor de izolaţie se evaluează prin compararea rezultatelor măsurătorilor cu valori de referinţă, este esenţial ca încercările să fie efectuate în condiţii bine controlate (temperatură, umiditate, tensiune de încercare, etc.).

Valorile tensiunilor de măsură sunt standardizate (500, 1000, 2500 şi 5000 V) şi se aleg în funcţie de tensiunea nominală a echipamentului. În anumite cazuri pot fi utilizate şi alte valori ale tensiunii. La efectuarea măsurătorilor tensiunea se aplică, în funcţie de structura echipamentului, între căile de curent între care este dispusă izolaţia şi/sau între fiecare cale de curent şi masă. În mod uzual, durata de aplicare a tensiunii este de un minut dar, în foarte multe cazuri aceasta se măsoară şi după 15, 30 sau 600 s.

Pentru măsurarea rezistenţei de izolaţie R_{iz}, cel mai adesea se folosesc aparate de măsură speciale (megohmmetre sau teraohmetre) care au în componenţă şi sursa de tensiune continuă (fig. 6.1). Megohmmetrele utilizate în prezent au afişaj digital şi permit alegerea valorii tensiunii de încercare, a duratei de aplicare şi a intervalelor de măsură. De asemenea, în anumite situaţii acestea pot calcula şi afişa valorile coeficientului de absorbţie k_{abs} (definit ca raportul între valoarea rezistenţei de izolaţie măsurată după 60 de secunde $R_{iz}(60)$ şi valoarea rezistenţei de izolaţie măsurată după 15 secunde $R_{iz}(15)$) şi pe cele ale indicelui de polarizare k_p definit în § 2.2.

Fig. 6.1. Megohmmetru Hioki 3455.

În unele situații determinarea rezistenței de izolație se face folosind metoda voltmetru – ampermetru. R_{iz} se obține făcând raportul între tensiunea continuă aplicată izolației (măsurată cu ajutorul voltmetrului) și intensitatea curentului electric (măsurată cu ajutorul ampermetrului). Datorită valorilor reduse ale intensității curentului măsurat, metoda voltmetru – ampermetru necesită utilizarea unor conductoare ecranate astfel încât influența curenților paraziți să fie cât mai mică.

6.2.1.2. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice, a capacității electrice și permitivității relative

Măsurarea acestor mărimi se poate face fie pe eșantioane prelevate din sistemele de izolație ale echipamentelor electrice, fie pe întreg ansamblul izolant al unui echipament. În cazul în care măsurătorile sunt efectuate pe mostre, se obțin informații privind calitatea izolației în condiții standard de încercare, fapt ce permite compararea rezultatelor obținute cu valorile de referință. În cazul în care încercările sunt efectuate pe întreg sistemul de izolație, rezultatele obținute permit urmărirea evoluției în timp a factorului de pierderi, capacității și permitivității. De regulă, determinarea acestor trei mărimi se face în cadrul aceleași încercări.

În cazul măsurătorilor efectuate în laborator, eşantioanele de materiale electroizolante solide pot fi sub formă de plăci, foi sau cilindri. Electrozii de măsură sunt aplicaţi pe ambele feţe ale eşantionului, rezultând astfel un condensator. Pentru eliminarea efectului de margine sunt utilizaţi electrozi de gardă cu lăţimea mai mare decât dublul grosimii eşantionului. De regulă, dimensiunile eşantioanelor se aleg în aşa fel încât capacitatea condensatorului format să se încadreze în limitele optime de măsurare ale aparatelor utilizate [3,28].

Determinarea proprietăţilor dielectrice ale lichidelor electroizolante se face cu ajutorul unor celule de măsură standardizate, caracterizate de capacităţi parazite foarte reduse şi de valori ale factorului de pierderi dielectrice foarte mici (de ordinul 10^{-5}). În fig. 6.2 este prezentată o celulă de măsură pentru lichide electroizolante de tipul *Irlab – CNRS* (Franţa), prevăzută cu electrozi cilindrici coaxiali realizaţi din oţel inoxidabil [39].

Pentru frecvenţe industriale (50/60 Hz) factorul de pierderi, capacitatea şi permitivitatea relativă se determină cu ajutorul *metodelor de zero*. În cazul în care frecvenţele de măsură sunt superioare valorii de 10 kHz sunt folosite *metode de rezonanţă*. În cele ce urmează vor fi descrise pe scurt aceste metode şi echipamentele specifice utilizate în cazul fiecăreia.

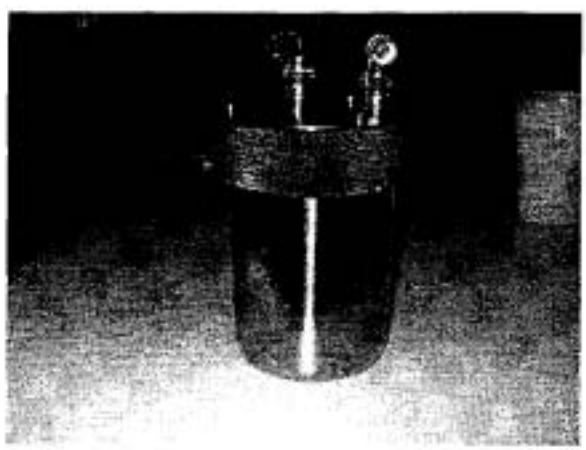


Fig. 6.2. Celulă de măsură pentru lichide *Irlab – CNRS*, cu electrozi cilindrici coaxiali şi volumul de lichid de 200 ml.

a) Metode de măsură care utilizează puntea Schering

Puntea *Schering* este echipamentul clasic utilizat pentru măsurarea capacității electrice, permitivității și factorului de pierderi. Din punct de vedere constructiv, puntea *Schering* are patru brațe: două brațe capacitive formate de capacitatea necunoscută C_x, respectiv capacitatea etalon C_N și două brațe rezistive R_3 și R_4 (fig. 6.3) Rezistența R_4 din brațul opus capacității de măsură este șuntată cu ajutorul unei capacități variabile C_4. Întreg ansamblul este alimentat de la o sursă de tensiune alternativă. Echilibrarea punții se face cu ajutorul indicatorului de nul montat pe diagonala MN (fig. 6.3).

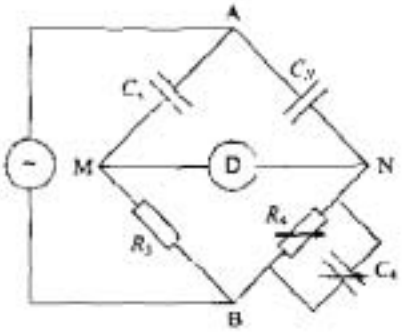


Fig. 6.3. Schema de principiu a punții *Schering*.

Din punct de vedere funcțional, sistemul de izolație asupra căruia se efectuează măsurători reprezintă un condensator cu pierderi dielectrice (C_x). Schema electrică echivalentă a acestui condensator este, în funcție de valoarea frecvenței tensiunii aplicate, serie sau paralel, cu componentele ideale C_s și R_s, respectiv C_p și R_p (fig 6.4). În cazul schemei serie, cele două componente sunt străbătute de același curent electric I_m, iar tensiunea prezintă două componente defazate între ele cu unghiul de pierderi δ. Din diagrama fazorială (fig. 6.4 a) corespunzătoare schemei echivalente serie rezultă:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega R_s C_s, \tag{6.1}$$

în care ω reprezintă pulsația tensiunii de alimentare.

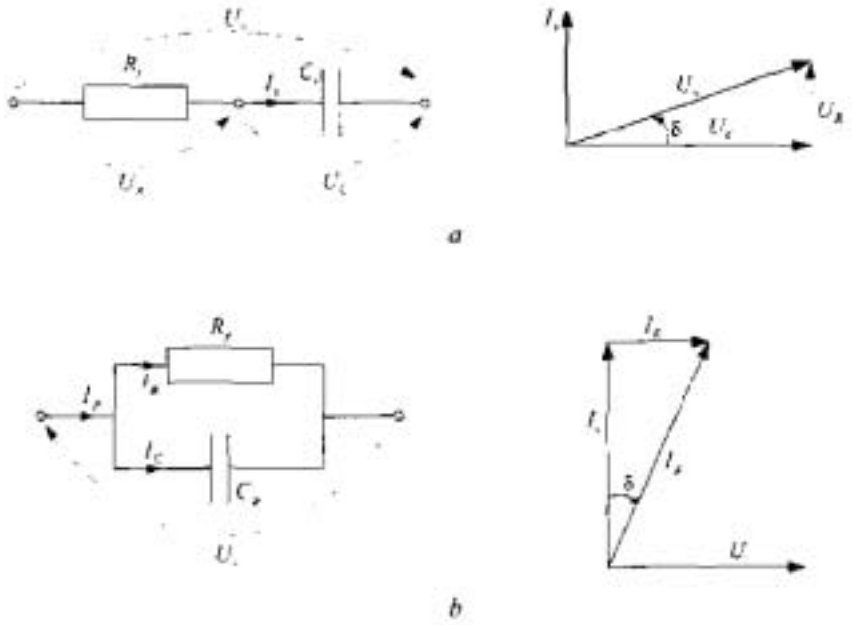


Fig. 6.4. Schema electrică echivalentă și diagrama fazorială corespunzătoare condensatorului cu pierderi *a* –serie; *b*- paralel.

Pentru schema echivalentă paralel, cu diagrama fazorială reprezentată în fig. 6.4 b, expresia factorului de pierderi este:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega R_p C_p}. \tag{6.2}$$

Egalând expresiile (6.1) și (6.2), rezultă că între componentele celor două scheme echivalente prezentate mai sus există următoarele relații:

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2\delta} C_s \\ R_p &= \frac{1+\operatorname{tg}^2\delta}{\operatorname{tg}^2\delta} R_s \end{aligned} \tag{6.3}$$

Se constată că diferențele între capacitățile C_p și C_s sunt cu atât mai mici cu cât factorul de pierderi este mai mic (sub 0,1% dacă $\operatorname{tg}\delta < 0{,}03$).

Echilibrarea punții *Schering* se face prin reglarea valorilor capacității

C_4 și a rezistențelor R_3 și R_4 până când intensitatea curentului prin diagonala MN este zero. Puntea *Schering* utilizează schema echivalentă serie și, prin urmare, atunci când puntea este echilibrată, sunt satisfăcute următoarele relații:

$$C_x = C_N \frac{R_3}{R_4}$$
$$\operatorname{tg}\delta = \omega C_1 R_1. \tag{6.4}$$

În general, punțile *Schering* utilizate în practică permit adaptarea schemei interne în funcție de natura obiectului de încercat. Atunci când este necesar, sunt utilizate punți *Schering* speciale care asigură eliminarea capacităților parazite. De asemenea, sunt disponibile și punți *Schering* automate pentru care echilibrarea se realizează automat iar valorile capacității, factorului de pierderi și tensiunii de încercare sunt afișate și memorate.

b) Metode de măsură care utilizează punțile inductive

Puntea inductivă diferă de puntea *Schering* clasică prin faptul că brațele rezistive sunt constituite din două înfășurări ale unui transformator special, prevăzut cu o a treia înfășurare, numită înfășurare de detecție, la bornele căreia este conectat indicatorul de nul (fig. 6.5). Pe una dintre cele două înfășurări este înseriată o rezistență R' reglabilă în paralel, o capacitate C' variabilă, cu rolul de a produce defazajul curentului.

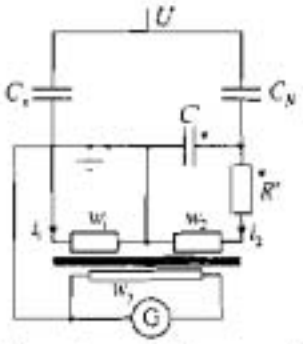


Fig. 6.5. Schema de principiu a punții inductive.

Echilibrarea punții inductive se face prin modificarea numerelor de spire w_1 și w_2 a celor două înfășurări principale conectate în brațele punții, cât și prin reglarea valorilor rezistenței R' și capacității C' în așa fel încât fluxul magnetic prin miezul transformatorului să se anuleze. La echilibru sunt satisfăcute următoarele relații:

$$C_x = \frac{w_2}{w_1} C_N$$
$$\operatorname{tg}\delta = \frac{w_2}{w_1} \omega C' R'. \tag{6.5}$$

Față de puntea *Schering*, puntea inductivă prezintă o serie de avantaje printre care faptul că influența capacităților parazite este mult diminuată și echilibrarea se face mai ușor.

c) Metode bazate pe fenomenul de rezonanță

Măsurătorile care se efectuează la frecvențe mari, superioare valorii de 10 kHz, sunt realizate cu ajutorul metodelor de rezonanță (*Qmetru*) [40]. Aceste metode sunt bazate pe măsurarea tensiunii care apare la bornele unui circuit rezonant, alimentat cu o tensiune cunoscută. Schema de principiu utilizată este prezentată în fig. 6.6.

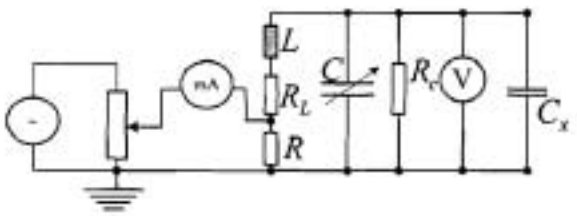


Fig. 6.6. Schema de principiu utilizată pentru metoda de rezonanță.

Pentru efectuarea măsurătorilor se reglează intensitatea curentului de intrare (sau tensiunea) în funcție de valoarea frecvenței alese. Fără ca obiectul de încercat să fie conectat, parametrii circuitului rezonant *RC* se reglează până la obținerea unui semnal de amplitudine maximă, notându-se valoarea tensiunii U_0 (măsurată cu voltmetru V) și a valorii capacității C. În continuare, obiectul de încercat este conectat și sunt efectuați aceiași pași,

notându-se valorile U_1, respectiv C_1. Atunci când proba este conectată la bornele Qmetrului şi circuitul *RC* este acordat astfel încât amplitudinea semnalului să fie maximă, capacitatea totală rămâne practic constantă dacă $R_L \cdot R_C << 1$. Capacitatea obiectului de încercat este chiar diferența $C_x = C_1 - C_0$. Factorul de pierderi dielectrice se calculează cu relația:

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{C_1}{C_x}\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}\right), \tag{6.6}$$

în care C_1 este capacitatea totală din circuit (inclusiv cea a voltmetrului şi cea a bobinei), respectiv Q_1 şi Q_0 reprezintă valorile lui Q calculate cu relația $Q = C/U$.

d) Determinarea permitivității relative

Determinarea permitivității relative este posibilă în cazul eşantioanelor prelevate din sistemele de izolație sau a obiectelor de încercat a căror configurație geometrică este cunoscută cu exactitate. În cazul eşantioanelor sunt folosite celule de măsură standardizate alcătuite din doi electrozi plani şi prevăzute cu electrod de gardă [41]. Valoarea permitivității relative se determină pornind de la măsurarea capacității celulei de măsură între ai cărei electrozi este plasată proba cu relația:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x - C_p}{C_0}, \tag{6.7}$$

în care C_x reprezintă capacitatea măsurată a celulei care conține proba, C_p este capacitatea parazită (a celulei şi a cablurilor de legătură) şi C_0 reprezintă capacitatea geometrică a celulei de măsură (capacitatea celulei cu dielectric aer şi cu distanța dintre electrozi egală cu grosimea probei).

6.2.1.3. Verificarea rigidității dielectrice. Încercări la tensiune mărită

Determinarea rigidității dielectrice a materialelor electroizolante care intră în componența sistemelor de izolație se realizează în laboratoarele de

încercări conform standardelor în vigoare. Câteva informații referitoare la determinarea rigidității dielectrice E_{str} a materialelor electroizolante solide au fost consemnate în capitolul 3, §3.4. Precizăm însă că eşantioanele utilizate pentru determinarea rigidității dielectrice nu sunt numai sub formă de plăci, ci pot fi şi sub formă de benzi, pelicule sau tuburi. În fig. 3.7 au fost prezentate tipurile de electrozi utilizați în cadrul încercărilor experimentale.

Pentru determinarea rigidității dielectrice a lichidelor electroizolante sunt utilizate vase speciale din porțelan în interiorul cărora sunt fixați electrozii metalici (care sunt realizați din cupru, alamă sau oțel inoxidabil).

În cadrul încercărilor experimentale, între cei doi electrozi se aplică o tensiune electrică a cărei valoare se mărește până în momentul în care se produce fenomenul de străpungere. Creşterea tensiunii se poate efectua în două moduri: o creştere uniformă, de la zero până la valoarea la care se produce străpungerea U_{str}, sau o creştere rapidă, până la o valoare de aproximativ 35 % din U_{str}, urmată de o creştere în trepte de circa 5%, cu menținere de maxim 5 s pe fiecare treaptă. Rigiditatea dielectrică se determină cu ajutorul relației:

$$E_{str} = \frac{U_{str}}{d}, \tag{6.8}$$

în care d reprezintă grosimea izolației în locul în care s-a produs străpungerea sau distanța dintre electrozi, în cazul încercărilor efectuate pentru lichide electroizolante.

Determinarea rigidității dielectrice presupune utilizarea unui număr de cinci eşantioane realizate din acelaşi material. Valoarea tensiunii de străpungere se calculează ca fiind media aritmetică a celor cinci valori obținute pentru fiecare determinare. Dacă valoarea abaterii medii depăşeşte 10 %, sau una dintre cele cinci valori individuale se abate cu mai mult de 15 %, se refac încercările folosind alte cinci eşantioane.

Deoarece izolațiile echipamentelor electrice sunt supuse, în permanență solicitărilor combinate, acestea trebuie să prezinte o rezervă suficient de mare în ceea ce priveşte rigiditatea dielectrică, în raport cu tensiunea nominală, în scopul evitării apariției fenomenelor de străpungere.

Prin urmare, sistemele de izolaţie ale echipamentelor electrice sunt supuse unor încercări cu tensiune mărită, alternativă sau continuă. De asemenea, izolaţiile echipamentelor electrice sunt încercate cu impulsuri de tensiune.

a) Încercarea cu tensiune alternativă mărită de frecvenţă industrială

Încercarea izolaţiei cu tensiune alternativă mărită de frecvenţă industrială reprezintă metoda cea mai răspândită şi cea mai veche de control a calităţii izolaţiei. Valorile tensiunilor de încercare utilizate sunt considerabil mai mari decât tensiunea nominală a echipamentului tocmai pentru a stabili valoarea *intervalului de siguranţă* (sau a *rezervei de tensiune*). De asemenea, cu prilejul efectuării acestei încercări pot fi descoperite eventualele defecte ale izolaţiei apărute în timpul exploatării. În cazul în care în urma procesului de îmbătrânire apar, la nivelul izolaţiei, unele defecte care evoluează în timp, cu prilejul încercării la tensiune mărită, este posibil să se producă străpungerea izolaţiei (caz în care încercarea este una distructivă). Prin urmare, încercările cu tensiune alternativă mărită de frecvenţă industrială sunt distructive şi nedistructive. Dintre acestea amintim [3,28]:

încercări distructive

- proba la tensiunea de ţinere timp de un minut;
- determinarea tensiunii medii de conturnare a izolaţiei, în funcţie de natura echipamentului în stare uscată, sub ploaie artificială sau în condiţii de poluare artificială;
- determinarea tensiunii de străpungere;

încercări nedistructive

- determinarea tensiunii de apariţie şi de stingere a descărcărilor parţiale interne;
- determinarea tensiunilor de apariţie a fenomenelor de ionizare, fenomenelor corona şi a altor descărcări nedisruptive pe suprafaţa izolaţiei.

Deşi încercările cu tensiune alternativă mărită sunt utilizate în majoritatea cazurilor, menţionăm că, în cadrul acestora, repartiţia tensiunii

şi, în consecinţă, a câmpului electric în interiorul izolaţiilor nu este identică cu cea existentă în condiţiile normale de funcţionare. În consecinţă, pentru estimarea stării izolaţiei este necesar să se efectueze şi alte tipuri de încercări.

Încercarea cu tensiune mărită se execută fie pe întreg echipamentul, fie numai pe unele părţi constructive şi poate fi realizată în fabrica constructoare, la sfârşitul execuţiei, la locul de montaj, după efectuarea operaţiunilor de montare, reparare sau modernizare, sau periodic, pentru evaluarea stării izolaţiei.

Încercarea propriu zisă constă în aplicarea tensiunii de încercare, pe rând, între bornele de înaltă tensiune a echipamentului şi masă şi menţinerea acesteia timp de un minut. Valoarea tensiunii de încercare este stabilită prin standarde şi, în majoritatea cazurilor, este cel puţin egală cu dublul valorii tensiunii nominale.

b) Încercarea cu tensiune continuă mărită

O altă metodă de evaluare a stării izolaţiei o constituie încercarea cu tensiune continuă mărită. Practic, această metodă constă în aplicarea unei tensiuni redresate între borna de înaltă tensiune a echipamentului şi masă şi măsurarea curentului care străbate izolaţia. Uzual, creşterea tensiunii aplicate se face în trepte de 2 – 3 kV, începând de la o valoare egală cu 30 % din valoarea maximă de încercare. Fiecare treaptă de tensiune se menţine timp de 20 – 30 de secunde (acest interval include şi timpul necesar creşterii tensiunii până la valoarea corespunzătoare treptei respective) [28].

Curentul care apare în circuit se măsoară după un interval de 15 s din momentul începerii creşterii tensiunii la valoarea corespunzătoare treptei. În anumite cazuri, pentru creşterea preciziei de determinare a curentului, pentru fiecare treaptă de tensiune se măsoară trei valori ale curentului i_{1-3} la trei momente de timp t_{1-3}. Momentele de timp la care se citeşte intensitatea curentului trebuie să satisfacă relaţia $t_1/t_2 = t_2/t_3$. Intensitatea curentului se calculează astfel: $i = \dfrac{i_1 i_3 - i_2^2}{i_1 + i_2 - 2i_2}$. Pentru evaluarea stării izolaţiei se trasează curba de variaţie a curentului în funcţie de valoarea tensiunii

aplicate. Forma acestei curbe indică gradul de îmbătrânire a izolației sau eventualele defecte. Dacă se înregistrează o variație liniară a curentului, izolația încercată se află în stare bună. Dacă însă, începând de la o anumită valoare a tensiunii, panta curbei de variație crește pronunțat, izolația este îmbătrânită.

Valoarea maximă a tensiunii de încercare continuă se stabilește în funcție de valoarea maximă de încercare cu tensiune alternativă la frecvență industrială, conform relației: $U_{i\,cc} = 1{,}6 \cdot U_{i\,ca}$. De asemenea, trebuie precizat că încercarea cu tensiune continuă mărită nu înlocuiește încercarea cu tensiune alternativă.

c) Încercări cu impulsuri de tensiune

În cadrul încercărilor izolațiilor la impulsuri de tensiune de trăsnet (ITT), la unde de supratensiune atmosferice (STA) și la impulsuri de tensiune de comutație, se urmărește verificarea nivelului de ținere a izolației și, după caz, determinarea tensiunii de conturnare (de exemplu, pentru izolatoarele LEA).

De regulă, aceste încercări se fac la fabricile constructoare de echipamente electrice sau în laboratoare de înaltă tensiune specializate. În fig. 6.7 este reprezentată forma de undă a unui impuls de tensiune de trăsnet [3].

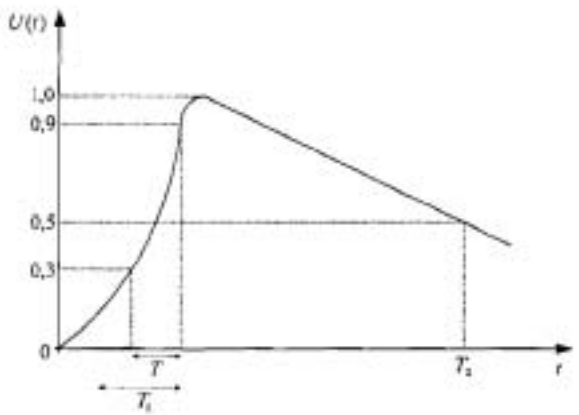


Fig. 6.7. Forma de undă corespunzătoare unui impuls de tensiune de trasnet (ITT).

Așa cum se poate observa, forma de undă prezintă o parte crescătoare numită *frontul impulsului*. În afară de valoarea tensiunii de vârf $V_{vârf}$, printre parametrii caracteristici impulsurilor de tensiune amintim *durata convențională a impulsului* T_1, care se definește prin relația $T_1 = 1{,}67 \cdot T$, în care T reprezintă intervalul de timp în care valoarea tensiunii crește de la 0,3 la 0,9 din valoarea de vârf. Frontul impulsului împreună cu partea descrescătoare formează semiamplitudinea undei de impuls. *Durata convențională a semiamplitudinii* T_2, se definește ca fiind intervalul de timp cuprins între momentul inițial și momentul în care tensiunea atinge 0,5 din valoarea de vârf [3].

Impulsul de tensiune al cărei formă de undă este reprezentată în fig. 6.7 este un impuls cu undă plină. În cadrul încercărilor mai sunt utilizate și impulsuri de tensiune cu undă tăiată (descreșterea tensiunii până la zero se face, în acest caz, foarte rapid, „tăierea" undei având loc pe frontul undei, la vârf sau pe porțiunea descrescătoare).

Pentru încercările cu impuls de tensiune se indică valoarea tensiunii de vârf în kilovoltivârf ($kV_{vârf}$) durata frontului și durata semiamplitudinii în microsecunde. În general, sistemele de izolație ale echipamentelor electrice sunt încercate la impulsul de tensiune de trăsnet și la impulsul de tensiune de comutație. ITT se caracterizează printr-o valoare foarte mică a duratei frontului (1÷10 μs) și printr-o semiamplitudine de câteva zeci de microsecunde. De exemplu, impulsul de tensiune de trăsnet cu undă plină, normal, are durata frontului egală cu 1,2 μs și durata semiamplitudinii de 50 μs. Impulsurile de tensiune de comutație sunt caracterizate prin durate mult mai mari ale frontului, cuprinse între câteva zeci și câteva mii de microsecunde. Impulsul de tensiune de comutație normal, cu undă plină, are durata frontului de 250 μs și durata semiamplitudinii de 2500 μs [28].

Tensiunile de încercare se obțin cu ajutorul unor generatoare de impuls, care sunt formate, în principal, din condensatoare conectate în paralel, încărcate de la o sursă de tensiune continuă și apoi, descărcate în serie în circuitul în care este conectat obiectul de încercat.

6.2.1.4. Metode pentru măsurarea nivelului descărcărilor parțiale

Măsurarea nivelului descărcărilor parțiale constituie o metodă de apreciere a calității unei izolații, în special în ceea ce privește gradul de omogenitate, prezența incluziunilor gazoase, a impurităților metalice sau a golurilor formate prin dezlipirea straturilor de izolație. Așa cum s-a descris în capitolul 4 al lucrării, §4.2.1.3, măsurarea nivelului descărcărilor parțiale înseamnă practic măsurarea uneia dintre următoarele mărimi: sarcina aparentă, curentul de descărcare mediu, debitul pătratic al sarcinilor aparente, etc.

Există două modalități de măsurare a nivelului descărcărilor parțiale: cu echipamentul electric scos din funcțiune (*măsurători off-line*) și cu echipamentul electric aflat în funcțiune (*măsurători on-line*).

a) Măsurarea off-line a nivelului descărcărilor parțiale

Principiul de măsură și schemele cele mai utilizate în cazul măsurătorilor off-line au fost prezentate în §4.2.1.3.

b) Măsurarea on-line a nivelului descărcărilor parțiale

În cazul măsurătorilor on-line, tensiunea de încercare este chiar tensiunea de funcționare cu care este alimentat echipamentul electric. Efectuarea acestor măsurători necesită montarea în interiorul echipamentului electric a unor senzori speciali (acest lucru se poate efectua în timpul fabricației sau ulterior, când echipamentul este oprit si retras din funcțiune).

Cei mai utilizați senzori de DP care se montează permanent în interiorul generatoarelor sau motoarelor electrice sunt [28]:

- senzori montați în crestăturile statorice care sunt practic antene cu bandă largă de frecvență, capabile să detecteze impulsurile DP, separând în același timp zgomotul din funcționare;
- senzori de linie care pot fi de două feluri: capacități de 80 pF sau transformatoare de radiofrecvență.

În afară de performanțele de funcționare, deosebirea fundamentală care

există între cele două categorii de senzori este aceea că cei din prima categorie trebuie montaţi în interiorul crestăturii, sub pană sau, mai eficient între barele înfăşurării, în timp ce senzorii capacitivi sau transformatoarele de radiofrecvenţă sunt montaţi la bornele înfăşurărilor. În general, pentru fiecare fază în parte, sunt utilizaţi câte doi senzori DP.

Semnalele transmise de senzorii DP sunt prelucrate de un instrument de măsură numeric, care înlătură impulsurile parazite din reţea şi din interiorul echipamentului şi numără şi sortează impulsurile calculând, în acelaşi timp, mărimile specifice. În ultimul timp, echipamentele utilizate monitorizează on-line funcţionarea echipamentelor electrice, pe lângă semnalele transmise de senzorii DP determinând şi alţi parametrii de funcţionare: temperatura, nivelul vibraţiilor, curenţii pe fiecare fază, etc...

În cazul transformatoarelor electrice de putere, detectarea on-line se face folosind metode bazate pe ultrasunete. Aceste metode sunt bazate pe faptul că amorsarea unei descărcări parţiale produce o undă de presiune care se propagă în mediul înconjurător suferind refracţii şi reflexii multiple. Prin urmare, interceptând aceste unde sonore, DP pot fi localizate. Detectoarele de ultrasunete utilizate în practică au în componenţă un cristal piezoelectric care transmite semnalul unui analizor. În momentul de faţă există transformatoare de putere care sunt prevăzute cu astfel de instalaţii de detectare a descărcărilor parţiale care transmit, la anumite intervale de timp, informaţii unor sisteme informatice de supraveghere. De asemenea, sunt utilizate şi detectoare DP cu ultrasunete portabile care prezintă eficienţă crescută, sunt robuste şi uşor de utilizat.

6.3. Evaluarea stărilor izolaţiilor transformatoarelor electrice şi bobinelor de reactanţă

Statisticile existente în lume arată că aproape jumătate dintre cauzele care determină scoaterea din funcţiune a transformatoarelor şi autotransformatoarelor de putere sunt datorate defectelor apărute la nivelul sistemelor de izolaţie. Evaluarea stărilor sistemelor de izolaţie ale transformatoarelor este cu atât mai importantă cu cât fiabilitatea sistemelor

energetice depinde în mare măsură de siguranța în funcționare a acestor echipamente.

O caracteristică aparte existentă în cazul transformatoarelor și bobinelor de reactanță este repartiția neuniformă a tensiunii. Acest lucru conduce la apariția unor supratensiuni locale care, în anumite situații, pot depăși chiar valoarea tensiunii de ținere. Solicitările care se exercită asupra izolației sunt neuniforme și pot conduce la apariția unor puncte slabe și, în timp, chiar la defecte severe.

6.3.1. Determinarea stărilor izolațiilor transformatoarelor și autotransformatoarelor de putere

Probele necesare pentru evaluarea stării izolației transformatoarelor electrice se efectuează la un interval de timp de minim 12 ore după umplerea cu ulei a cuvei și aerisirea acesteia. Ordinea efectuării încercărilor este următoarea:

- determinarea rigidității dielectrice și a factorului de pierderi a uleiului;
- măsurarea rezistenței de izolație a înfășurărilor;
- măsurarea factorului de pierderi corespunzător izolației înfășurărilor;
- verificarea cu tensiune mărită a izolației înfășurărilor;
- opțional se poate măsura și nivelul descărcărilor parțiale.

6.3.1.1. Determinarea proprietăților dielectrice ale uleiului

Determinarea rigidității dielectrice și a factorului de pierderi se face utilizând probe de ulei prelevate din cuvele transformatoarelor pe la bușoanele prevăzute special. De asemenea, se vor face determinări pe probe de ulei prelevate din părțile cele mai de jos ale cuvei și conservatorului. Încercările se efectuează pentru toate transformatoarele care au tensiunea nominală cuprinsă în intervalul 6 – 400 kV.

Pentru prelevarea probelor trebuie să se asigure condiții speciale prin care să se evite modificarea stării uleiului prin contaminarea acestuia cu diverse substanțe. Recoltarea eșantioanelor de ulei din cuva transformatorului aflat în funcțiune se face la o temperatură de 20 °C și la

umiditatea atmosferică de maxim 80 %, numai în situaţia în care temperatura în partea superioară a cuvei este de cel puţin 50 °C. În cazul transformatoarelor noi sau a acelora care au suferit reparaţii capitale, temperatura minimă a uleiului prelevat pentru probe poate să fie de 10 °C. În tabelul 6.1 sunt prezentate valorile minime ale rigidităţii dielectrice şi valorile maxime ale factorului de pierderi.

Tabelul 6.1. $E_{str\ min}$ şi $tg\hat{o}_{max}$ pentru uleiul mineral folosit în sistemele de izolaţie ale transformatoarelor de putere [28].

Momentul	Tensiunea nominală [kV]							
	6 -35		60-110		220		400	
	tgδ	E_{str} [kV/mm]	tgδ	E_{str} [kV/mm]	tgδ	E_{str} [kV/mm]	tgδ	E_{str} [kV/mm]
Înainte de umplere	0,005	18	0,005	20	0,005	22	0,05	24
La 72 de ore de la umplere	0,02	16	0,02	18	0,015	20	0,015	22
În exploatare	0,2	12	0,15	16	0,1	18	0,07	20

6.3.1.2. Măsurarea rezistenţei de izolaţie

Măsurarea rezistenţei de izolaţie se efectuează cu ajutorul megohmmetrelor, tensiunea de măsură stabilindu-se în funcţie de tensiunea nominală a înfăşurării. Rezistenţa de izolaţie se măsoară între fiecare fază şi masă, pentru fiecare încercare determinându-se şi temperatura înfăşurării care, în general se consideră că este egală cu temperatura uleiului din partea superioară a cuvei.

Pentru compararea valorilor rezistenţelor de izolaţie măsurate la temperaturi diferite, sunt utilizaţi coeficienţi de corecţie a rezistenţei cu temperatura. În tabelul 6.2 sunt indicate valorile minime admise pentru rezistenţa de izolaţie măsurată după 60 de secunde $R_{iz\,60}$ a transformatoarelor aflate în funcţionare. În cazul transformatoarelor care au suferit reparaţii efectuate în ateliere în cadrul cărora a fost înlocuită parţial sau total izolaţia, sau s-a procedat la uscarea acesteia, trebuie ca valoarea rezistenţei $R_{iz\,60}$ la punerea transformatorului în funcţiune să fie cel puţin egală cu 70 % din valoarea măsurată în atelier. Pentru înfăşurările cu U_n< 500 V, valoarea minimă a rezistenţei $R_{iz\,60}$ la 20 °C trebuie să fie 2 MΩ.

Tabelul 6.2. Valorile minime admise pentru rezistența de izolație $R_{iz\,60}$ a înfășurărilor transformatoarelor de putere [28].

Un [kV]	≤ 60	110 - 220	400
$R_{iz\,60}$ la 20 °C	300	600	1000
$R_{iz\,60}$ la 50 °C	90	180	300

Odată cu măsurarea rezistenței de izolație se determină și coeficientul de absorbție k_{abs} (§6.2.1.1). Se consideră că izolația se află în stare bună dacă pentru transformatoare cu $U_n \leq 110\,\text{kV}$, $k_{abs} > 1{,}2$ și pentru transformatoare cu $U_n > 110\,\text{kV}$, $k_{abs} > 1{,}3$. Atunci când valorile coeficientului de absorbție sunt apropiate de unitate, se consideră că izolația transformatorului prezintă un conținut crescut de apă sau are unele defecte.

6.3.1.3. Măsurarea factorului de pierderi

Măsurarea factorului de pierderi dielectrice se realizează pentru fiecare înfășurare, celelalte înfășurări fiind conectate la masă. Tensiunile utilizate pentru determinarea factorului de pierderi se stabilesc în funcție de valoarea tensiunii nominale a echipamentului. În cazul în care $U_n > 10$ kV, atunci tensiunea de măsură este de 10 kV. Dacă însă $U_n < 10$ kV, tensiunea la care se efectuează măsurătorile este chiar tensiunea nominală a înfășurării. Pentru a putea fi comparate între ele, valorile factorului de pierderi dielectrice determinate la momente de timp diferite și la temperaturi diferite sunt corectate cu ajutorul unor coeficienți de temperatură. Se consideră că izolația înfășurărilor se află în stare bună dacă valorile factorului de pierderi dielectrice sunt inferioare celor prezentate în tabelul 6.3.

6.3.1.4. Încercarea cu tensiune alternativă mărită

Încercarea cu tensiune alternativă mărită cu frecvența de 50 Hz se efectuează în exploatare cu transformatorul complet montat și cu comutatorul de prize pe poziția corespunzătoare numărului maxim de spire. Tensiunea de încercare se aplică timp de un minut, între fiecare înfășurare și masă, celelalte înfășurări fiind legate la pământ.

Pentru transformatoarele aflate în exploatare care au suferit reparații,

valoarea tensiunii de încercare se stabileşte în funcţie de tensiunea nominală a înfăşurării şi de tipul reparaţiei efectuate. În timpul încercărilor (1 minut) nu trebuie să apară străpungeri sau conturnări ale izolaţiei sau alte fenomene anormale.

Tabelul 6.3. Valorile maxime admise pentru factorul de pierderi dielectrice care se produc în izolaţia transformatoarelor de putere aflate în exploatare [28].

U_n [kV]	≤ 10	10 - 60	110 - 220	400
tgδ la 20 °C [%]	4	2,5	2,5	1,5
tgδ la 50 °C [%]	11	7	7	2,5

6.3.1.5. Încercarea cu impulsuri de tensiune

Probele cu impulsuri de tensiune de trăsnet şi de comutaţie se efectuează în fabrică sau în laboratoarele de înaltă tensiune specializate. Încercarea cu impuls de tensiune de trăsnet se face cu o undă de impuls standardizată. La început se aplică un impuls de tensiune cu valoarea cuprinsă între 0,5 şi 0,75 % din tensiunea de vârf. Apoi sunt aplicate trei impulsuri cu unda de tensiune plină. Această secvenţă de încercare se aplică succesiv fiecărei borne a transformatorului, în timp ce restul bornelor sunt conectate la pământ.

La încercările cu impuls de comutaţie, impulsurile se aplică fie direct de la generatorul de impulsuri la capătul dinspre linie al înfăşurării, fie prin intermediul unei înfăşurări de joasă tensiune, astfel încât tensiunea de încercare să fie transmisă inductiv la înfăşurarea de încercat.

Evaluarea stării izolaţiei se face pe baza analizei formelor de undă ale impulsurilor aplicate. Dacă între formele de undă ale curenţilor şi tensiunilor obţinute la aplicarea tensiunii de vârf, respectiv a tensiunii reduse, nu există diferenţe semnificative, rezultă că starea izolaţiei este bună.

6.3.1.6. Măsurarea nivelului descărcărilor parţiale

Măsurarea nivelului descărcărilor parţiale se poate face, fie utilizând schemele electrice prezentate în §4.2.1.3, fie cu ajutorul aparatelor care detectează ultrasunetele. Valorile tensiunilor de încercare se stabilesc în

funcţie de valoarea maximă a tensiunii celei mai ridicate la care poate fi conectată înfăşurarea examinată.

În cazul izolaţiilor aflate în stare bună, sarcina aparentă nu trebuie să ia valori mai mari de 1000 pC după 30 de minute de la aplicarea tensiunii de încercare. Al doilea factor care trebuie examinat se referă la stabilitatea în timp a descărcărilor; astfel, dacă nivelul descărcărilor parţiale prezintă tendinţa de creştere în timp, izolaţia transformatorului este îmbătrânită sau prezintă defecte [3].

6.3.2. Determinarea stărilor izolaţiilor bobinelor

6.3.2.1. Determinarea proprietăţilor dielectrice ale uleiului

Uleiul aflat în cuvele bobinelor este supus unor încercări în vederea determinării factorului de pierderi şi rigidităţii dielectrice. Probele de ulei sunt prelevate astfel încât să nu se modifice starea uleiului din cuvă. Umiditatea maximă existentă în mediul ambiant în momentul prelevării probelor de ulei nu trebuie să depăşească 80 % la 20 °C. În cazul echipamentelor închise ermetic, în mod obişnuit nu se iau probe de ulei în vederea determinării proprietăţilor dielectrice. Rezultatele obţinute sunt comparate cu valorile de referinţă corespunzătoare tipului de ulei şi tensiunii nominale a bobinei.

6.3.2.2. Măsurarea rezistenţei de izolaţie

Măsurarea rezistenţei de izolaţie a înfăşurărilor faţă de părţile metalice conectate la pământ se efectuează cu megohmmetrul. Ca şi în cazul transformatoarelor, tensiunea de încercare se stabileşte în funcţie de datele nominale ale bobinei. De asemenea, pentru a putea fi comparate, valorile rezistenţei de izolaţie obţinute la diferite momente, sunt corectate cu ajutorul unui coeficient de variaţie cu temperatura. Se consideră că temperatura bobinei este egală cu temperatura uleiului situat în partea superioară cuvei.

6.3.2.3. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice

Factorul de pierderi corespunzător izolaţiei unei bobine se determină, de obicei, tot cu ajutorul punţii *Schering*. Măsurătorile se efectuează la o umiditate de maxim 80 % şi numai după ce izolatoarele la care sunt conectate capetele înfăşurărilor sunt curăţate corespunzător.

Valoarea tensiunii de măsură se stabileşte în funcţie de datele nominale ale bobinei. Ca şi în celelalte cazuri, valorile factorului de pierderi sunt corectate cu ajutorul unui coeficient de variaţie cu temperatura. În momentul punerii în funcţiune, factorul de pierderi dielectrice nu trebuie să depăşească cu mai mult de 30 % valoarea măsurată în fabrica constructoare.

6.3.2.4. Încercarea cu tensiune alternativă mărită

Izolaţia bobinelor este supusă probei de tensiune alternativă mărită cu frecvenţa de 50 Hz, timp de un minut. Valoarea de vârf a tensiunii se stabileşte în funcţie de tensiunea nominală a bobinei. În timpul efectuării probelor nu trebuie să se producă străpungerea sau conturnarea izolaţiei sau alte fenomene anormale.

6.4. Diagnosticarea stărilor izolaţiilor generatoarelor şi motoarelor electrice

6.4.1. Generatoare sincrone

Încercările la care sunt supuse generatoarele sincrone în vederea evaluării stărilor izolaţiilor sunt:

- determinarea rezistenţei de izolaţie faţă de masă a înfăşurărilor şi a celorlalte componente aflate sub tensiune;
- determinarea factorului de pierderi dielectrice corespunzător izolaţiei statorice;
- încercări cu tensiune mărită.

Aceste probe se efectuează atât în fabrica constructoare, la încheierea procesului de fabricaţie cât şi pe parcursul duratei de exploatare în vederea

stabilirii gradului de îmbătrânire a izolaţiei.

6.4.1.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie

Măsurarea rezistenţei de izolaţie se realizează atât pentru înfăşurările statorice cât şi pentru cele rotorice. Tensiunile la care se efectuează măsurătorile se stabilesc în funcţie de datele nominale ale generatorului şi, în general, sunt cuprinse între 1000 şi 5000 V pentru stator şi de 1000 V pentru rotor (tabelul 6.4). Măsurătorile se realizează la temperatura ambiantă şi pentru fiecare măsurătoare este notată temperatura înfăşurărilor (măsurată cu ajutorul unui termometru fixat în părţile accesibile ale bobinelor sau folosind traductoare de temperatură plasate în barele statorice).

Tabelul 6.4. Valorile tensiunilor de măsură pentru determinarea rezistenţei de izolaţie a generatoarelor electrice [28].

U_n [V]	Tensiunea de încercare [V]
≤ 1000	500
1000 – 3000	1000
3000 – 16000	2500
> 16000	5000

Rezistenţa de izolaţie se determină după 15, 60 şi respectiv 600 de secunde din momentul aplicării tensiunii, pentru fiecare fază în parte faţă de masă, celelalte înfăşurări fiind conectate la pământ. Astfel, pe baza măsurătorilor efectuate se pot determina valorile indicelui de polarizare k_p şi a indicelui de absorbţie k_p. Dacă temperatura înfăşurărilor este cuprinsă între 10 şi 30 °C, iar $k_p \geq 1{,}5$ şi $k_{abs} \geq 1{,}3$, izolaţia se află în stare bună [28].

Valorile rezistenţei de izolaţie obţinute în urma măsurătorilor pe maşini aflate în exploatare trebuie să respecte limitele indicate de fabricant. În situaţia în care aceste limite nu sunt precizate, valoarea rezistenţei de izolaţie trebuie să fie egală cu cel puţin 50 % din rezistenţa de izolaţie măsurată în fabrică la aceeaşi valoare a temperaturii. Dacă şi această indicaţie lipseşte, se foloseşte următoarea relaţie de calcul pentru determinarea valorii minime admisibile în megohmi:

$$R_{iz} = \frac{k_T \cdot U_n}{1000 + \frac{S_n}{100}}, \tag{6.9}$$

în care U_n reprezintă tensiunea nominală a generatorului în volţi, S_n puterea aparentă în kilovoltamperi şi k_T este coeficientul de variaţie a rezistenţei de izolaţie cu temperatura.

Pentru generatoarele cu tensiunea nominală inferioară valorii de 1000 V, se consideră că izolaţia este în stare bună dacă rezistenţa de izolaţie este mai mare de 1 MΩ. În cazul generatoarelor sincrone ale căror statoare sunt răcite cu apă, valoarea minimă a rezistenţei de izolaţie este de 2 MΩ.

6.4.1.2. Încercarea cu tensiune alternativă mărită

Încercarea cu tensiune alternativă mărită cu frecvenţă 50/60 Hz se realizează pe fiecare fază a generatorului, celelalte două faze fiind conectate la masă. Valoarea tensiunii de încercare în kilovolţi se determină cu ajutorul relaţiei [28]:

$$U_{inc} = \upsilon(2U_n + 1), \tag{6.10}$$

în care U_n reprezintă tensiunea nominală a înfăşurării în kilovolţi şi υ este un coeficient a cărei valoare depinde de momentul ales pentru efectuarea încercării. Astfel, υ = 1 în cazul bobinelor noi, υ = 0,85 la punerea în funcţiune a maşinii, υ = 0,75 după reparaţii parţiale sau avarii care au afectat bobinajul şi υ = 0,65 în cazul încercărilor profilactice.

În cazul încercărilor cu tensiune alternativă mărită, izolaţia înfăşurărilor trebuie să reziste la tensiunea de încercare timp de un minut. În cazul generatoarelor sincrone de mare putere, unii constructori utilizează un plan special de încercări. Acesta constă în faptul că după montarea primului rând de bare în crestăturile statorului, se efectuează o primă încercare cu tensiune mărită. După montarea celui de-al doilea strat, se efectuează o a doua încercare, cu o tensiune ceva mai mică şi cu primul rând de bare conectat la pământ. În cazul generatoarelor aflate în exploatare, ale căror înfăşurări statorice au fost parţial înlocuite, tensiunea de încercare este cea stabilită cu relaţia (6.10) în care υ = 1.

Încercările cu tensiune alternativă mărită realizate pe statoarele răcite

cu apă necesită golirea instalaţiei de răcire şi vidarea acesteia cu ajutorul unor pompe de vid înaintat. Atunci când este posibil, încercările cu tensiune alternativă mărită se efectuează cu generatorul deschis, astfel încât să poată fi detectată prezenţa vreunui defect şi să se evite apariţia şi propagarea incendiilor.

6.4.1.3. Încercarea cu tensiune continuă mărită

Această probă se realizează pentru fiecare fază în parte, faţă de masă, cu celelalte două faze conectate la pământ. Valoarea tensiunii de măsură se stabileşte conform relaţiei $U_{i\,cc} = 1{,}6 \cdot U_{i\,ca}$, în care $U_{i\,ca}$ reprezintă tensiune de încercare la proba cu tensiune alternativă mărită. Creşterea tensiunii se efectuează în trepte de minim 2 kV şi, pentru fiecare valoare se măsoară intensitatea curentului la 15, 30 şi 60 de secunde de la aplicarea tensiunii. Datele obţinute se prelucrează şi se interpretează aşa cum s-a arătat în §6.2.1.3.

6.4.1.4. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice

Măsurarea factorului de pierderi dielectrice se face numai la maşinile de înaltă tensiune. În timpul procesului de fabricaţiei, factorul de pierderi dielectrice se determină pentru fiecare bobină, semibobină sau bară în parte. Măsurătorile se efectuează pentru mai multe valori ale tensiunii de încercare, de obicei în trepte de 0,2 U_n. De obicei, măsurătorile se efectuează pe porţiunea dreaptă a bobinelor între mănunchiul de conductoare şi stratul de lac conductor aplicat. Uneori, pentru efectuarea măsurătorilor peste izolaţia bobinei sau barei se aplică un electrod metalic din foiţă de aluminiu.

În majoritatea cazurilor, tgδ măsurat la 0,2 U_n nu trebuie să depăşească valoarea de 0,03. De asemenea, în funcţie de tipul şi de valoarea tensiunii nominale a maşinii, se urmăreşte variaţia factorului de pierderi dielectrice între două trepte de tensiune, care trebuie să fie inferioară anumitor valori tabelate.

Verificările efectuate în timpul exploatării la locul de montaj, vizează determinarea factorului de pierderi dielectrice global (corespunzător

întregului sistem de izolație al mașinii). În astfel de situații măsurătorile se realizează cu puntea *Schering* clasică sau inductivă. Încercările se efectuează pentru fiecare fază în parte. Valorile tensiunilor la care se efectuează măsurătorile nu depășesc, de regulă, tensiunea nominală a mașinii. De asemenea, pentru fiecare măsurătoare efectuată se notează valoarea temperaturii înfășurărilor.

Diagnosticarea stării izolației în funcție de valorile factorului de pierderi dielectrice are la bază următorii parametri, ale căror valori corespunzătoare diverselor grade de îmbătrânire sunt trecute în tabelul 6.5:

- creșterea valorii absolute a factorului de pierderi determinat la $0{,}6U_n$ față de valoarea măsurată anterior: $A_k = \dfrac{\mathrm{tg}\delta_k - \mathrm{tg}\delta_{k-1}}{\mathrm{tg}\delta_{k-1}} \cdot 100$;
- valoarea absolută a variației factorului de pierderi pentru $0{,}2U_n$ și $0{,}8U_n$ $\Delta\mathrm{tg}\delta = \mathrm{tg}\delta_{0,8} - \mathrm{tg}\delta_{0,2}$;
- panta curbei $\mathrm{tg}\delta(U)$, exprimată în grade;
- pragul de ionizare, respectiv valoarea tensiunii exprimată în fracțiuni din tensiunea nominală la care se produce modificarea pantei curbei $\mathrm{tg}\delta(U)$;

Tabelul 6.5. Valori ale factorilor de diagnosticare în funcție de starea izolației pentru generatoarele sincrone [28].

Starea izolației	A_k [%]	$\Delta\mathrm{tg}\delta$ [%]	Panta curbei $\mathrm{tg}\delta(U)$ [grade]	Tensiunea de ionizare $\cdot U_n$
Foarte bună	< 10	< 0,75	< 10	>> 0,6
Îmbătrânire normală	< 20	≤ 1	< 15	> 0,6
Îmbătrânire avansată	> 50	>> 1	>> 15	0,6 – 0,4

Pe lângă parametrii enumerați mai sus, forma curbei $\mathrm{tg}\delta(U)$ oferă unele informații foarte importante referitoare la starea izolației. Astfel, o curbă descrescătoare indică faptul că izolația nu a atins gradul maxim de polimerizare sau că aceasta este umedă. Existența unor inflexiuni se poate datora, fie unor dezlipiri locale ale izolației de conductoarele de cupru, fie dezlipirilor locale ale straturilor care compun sistemul de izolație al mașinii.

6.4.1.5. Măsurarea nivelului descărcărilor parţiale

Diagnosticarea stării izolaţiei prin măsurarea nivelului descărcărilor parţiale se face mai rar, de regulă în cazul hidrogeneratoarelor şi turbogeneratoarelor care sunt dotate cu senzori DP în crestături. În timpul proceselor de fabricaţie sau cu ocazia efectuării reparaţiilor capitale în fabrici sau ateliere specializate, nivelul descărcărilor parţiale se determină pentru fiecare bară statorică în parte la valori ale tensiunii de încercare de $0{,}6U_n$ şi U_n.

Măsurările profilactice se fac numai în cazul generatoarelor sincrone care au tensiunea nominală superioară valorii de 6,3 kV. În aceste cazuri, nivelul descărcărilor parţiale se determină pentru fiecare fază în parte, în timp ce celelalte două faze sunt conectate la masă.

În majoritatea cazurilor se determină valoarea sarcinii aparente Q [pC] sau *debitul pătratic redus* al sarcinii aparente, exprimat în decibeli şi raportat la un nivel de referinţă $d_0 = 10^{-9}$ C^2/sF:

$$\delta = 10 \cdot \log \frac{d}{d_0}, \qquad (6.11)$$

în care $d = D/C$ este debitul pătratic redus exprimat în C^2/sF, unde D reprezintă debitul pătratic definit prin relaţia (4.16) - §4.2.1.3 şi C este capacitatea electrică corespunzătoare izolaţiei. În funcţie de valorile lui δ, se poate face o estimare a stării izolaţiei:

- $\delta < 30$ dB, izolaţia se află într-o stare foarte bună, descărcările parţiale fiind neglijabile.
- $\delta = 36 \div 46$ dB, indică existenţa unor descărcări parţiale slabe, acceptabile pentru generatoarele sincrone aflate în funcţiune, însă prea mari, inacceptabile pentru izolaţiile noi;
- $\delta = 45 \div 56$ dB, indică existenţa unei degradări avansate şi a prezenţei unor dezlipiri între straturile izolaţiei;
- $\delta > 56$ dB, indică producerea unor descărcări foarte intense şi a unor defecte serioase la nivelul sistemului de izolaţie.

Diagnosticarea mai precisă a stării izolaţiei prin determinarea nivelului descărcărilor parţiale se face cu ajutorul măsurătorilor on-line care

permit monitorizarea continuă a nivelului DP şi evidenţierea evoluţiei parametrilor înregistraţi.

6.4.2. Motoare electrice de curent alternativ

În cazul maşinilor electrice de curent alternativ care funcţionează în regim de motor, diagnosticarea stării izolaţiei se face cel mai adesea prin măsurarea rezistenţei de izolaţie şi încercarea cu tensiune mărită.

6.4.2.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie

Măsurarea rezistenţei de izolaţie se face atât la încheierea procesului de fabricaţie cât şi în timpul exploatării. De obicei sunt folosite megohmmetre ce pot furniza tensiuni de măşură cuprinse între 500 şi 2500 V. Valorile tensiunii de măsură U_m se aleg în funcţie de tensiunea nominală U_n a motorului.

Tabelul 6.6. Valorile tensiunii de măsură U_m utilizate pentru măsurarea rezistenţei de izolaţie a motoarelor de curent alternativ [28].

U_n [V]	Tensiunea de încercare [V]
≤ 500	500
500 – 3000	1000
> 3000	2500

Determinarea rezistenţei de izolaţie se efectuează pentru fiecare fază în parte, în timp ce celelalte două faze sunt conectate la pământ. În cazul motoarelor cu rotorul bobinat, măsurătorile se realizează separat pentru înfăşurarea statorică şi pentru cea rotorică. Rezistenţa de izolaţie se poate determina atât cu înfăşurările în stare rece (la temperatura ambiantă) cât şi la temperatura corespunzătoare regimului de funcţionare nominal. În cazul motoarelor cu $U_n > 3000$ V se determină coeficientul de absorbţie k_{abs} (§6.2.1.1), pentru temperaturi ale înfăşurărilor cuprinse între 10 şi 30 °C. În cazul motoarelor din a căror fişă tehnică lipseşte valoarea iniţială a rezistenţei de izolaţie, valoarea de control a R_{iz} se calculează cu ajutorul relaţiei (6.9).

6.4.2.2. Încercarea cu tensiune alternativă mărită

Încercarea cu tensiune alternativă mărită cu frecvenţa de 50 Hz se face pentru fiecare fază în parte, celelalte două faze fiind conectate la pământ numai pentru motoarele cu puterea nominală de cel puţin 50 kW. În cazul motoarelor cu rotoare bobinate, încercarea cu tensiune alternativă mărită se efectuează şi pentru înfăşurările rotorice.

Pentru înfăşurările statorice, valorile tensiunii de încercare se calculează cu ajutorul relaţiei (6.10), în care valorile factorului υ sunt cele prezentate în §6.4.1.2. Timp de un minut, cât durează încercarea, izolaţia motorului trebuie să reziste fără să se producă fenomene de străpungere, conturnare sau alte descărcări electrice superficiale.

Încercările efectuate asupra înfăşurărilor rotorice ale motoarelor sincrone se realizează cu tensiunea de încercare $U_{inc} = 10U_n$, cu condiţia ca $1500 \leq U_{inc} \leq 3500$. În cazul înfăşurărilor rotorice ale motoarelor asincrone, tensiunea de încercare se obţine din relaţia $U_{inc} = 2\ U_n + 1000$ V, în care U_n reprezintă tensiunea circuitului rotoric deschis, măsurată între inelele colectoare cu rotorul aflat în stare de repaus şi cu înfăşurările statorice alimentate cu tensiunea nominală. Ca şi în celelalte cazuri, sistemul de izolaţie al înfăşurărilor rotorice trebuie să reziste timp de un minut la tensiunea de încercare aplicată, fără să apară fenomene de străpungere sau de conturnare.

6.4.3. Maşini de curent continuu

Măsurătorile efectuate pentru determinarea stării izolaţiei maşinilor de curent continuu sunt cele descrise în paragraful precedent. Ca şi în cazul motoarelor de curent alternativ, pentru maşinile de curent continuu factorul de diagnostic principal este rezistenţa de izolaţie, la care se mai adaugă şi încercarea cu tensiune alternativă mărită cu frecvenţa de 50 Hz.

6.4.3.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie

Rezistenţa de izolaţie se determină cu megohmmetru pentru fiecare înfăşurare faţă de masă. Pentru maşinile de curent continuu care au tensiunea nominală mai mică sau egală cu 500 V, tensiunea de măsură este

de 500 V; pentru mașinile cu $U_n > 500$ V, valoarea tensiunii de măsură este de 1000 V. Măsurătorile se pot realiza atât cu mașina în stare rece cât și cu temperatura înfășurărilor apropiată de cea din regimul nominal de funcționare.

Pentru mașinile de puteri mici ($P_n < 1$ kW), rezistența de izolație trebuie să fie de minim 1 MΩ. Valori inferioare aceste limite indică faptul că izolația este în stare umedă. În cazul mașinilor de puteri medii și mari, rezistența de izolație în stare rece trebuie să fie de minim 10 MΩ, în timp ce, în stare caldă, aceasta trebuie să aibă valoarea de cel puțin 2,2 MΩ. Dacă măsurătorile efectuate în cele două situații conduc la valori mai mici ale rezistenței de izolație înseamnă că sistemul de izolație al mașinii prezintă defecte sau conținutul de umiditate este ridicat.

6.4.3.2. Încercarea cu tensiune alternativă mărită

Încercările cu tensiune alternativă mărită cu frecvența de 50 Hz se fac numai pentru mașinile de curent continuu cu puterea nominală mai mare sau egală cu 50 kW. Valoarea tensiunii de încercare se obține cu ajutorul relației $U_{inc} = 2\ U_n + 1000$ V, cu condiția ca $U_{inc} > 1500$ V.

În cadrul acestei încercări, izolația trebuie să reziste timp de un minut la tensiunea de încercare fără să se producă fenomenul de străpungere. Pe durata încercării sunt admise descărcările corona, descărcările parțiale sau alte fenomene de ionizare.

Încercările cu tensiune alternativă mărită se realizează și în cazul înfășurărilor rotorice. Valoarea tensiunii de încercare trebuie aleasă în așa fel încât diferența de potențial dintre două lamele colectoare alăturate să nu depășească 24 V.

6.5. Diagnosticarea stărilor izolațiilor cablurilor de energie

Izolațiile cablurilor de energie și accesoriile utilizate la liniile electrice subterane se supun la încercări în cadrul fabricii constructoare, la punerea în funcțiune și în timpul exploatării.

6.5.1. Încercarea izolaţiilor cablurilor de energie noi

Primele încercări la care sunt supuse sistemele de izolaţie ale cablurilor de energie se desfăşoară chiar în incinta fabricii constructoare. Acestea vizează verificarea proprietăţilor dielectrice, mecanice, termice, ş.a. ale materialelor utilizate, cât şi eficienţa tehnologiilor de fabricaţie. O particularitate existentă în cazul acestor echipamente electrice este aceea că încercările se efectuează concomitent atât asupra izolaţiei cablurilor cât şi asupra accesoriilor. Prin urmare, atestarea performanţelor sistemelor de izolaţie ale cablurilor şi a accesoriilor se execută pe mostre de cablu cu lungimea de 3 ÷ 5 m, cu cel puţin un manşon montat la mijloc şi două terminale instalate la capetele segmentului.

6.5.1.1. Încercări individuale

Segmentele de cablu pregătite pentru livrare sunt supuse unor *probe de străpungere* care constau în aplicarea unor tensiuni alternative sau continue, conform standardelor aflate în vigoare. Timpul de aplicare a acestor tensiuni este, în funcţie de caracteristicile tehnice ale cablului, de 5 până la 15 minute. În cadrul acestor încercări, tensiunea se aplică între fiecare conductor şi restul conductoarelor conectate împreună cu ecranul la masă.

Tot în cadrul probelor individuale se măsoară, cu ajutorul unor megohmmetre care pot furniza tensiuni de încercare cuprinse între 2500 şi 3000 V şi rezistenţa de izolaţie R_{iz} a cablului. Pornind de la valorile experimentale ale rezistenţei de izolaţie corespunzătoare întregului tronson de cablu, este calculată rezistenţa de izolaţie pe unitatea de lungime (1 km) $R_{iz\,1km}$ cu ajutorul relaţiei:

$$R_{iz\,1km} = \frac{R_{iz}}{L}\ [\mathrm{M\Omega km}]. \qquad (6.12)$$

De asemenea, pentru cablurile noi cu izolaţie extrudată cu tensiunea nominală mai mare de 1,8/3 kV, se determină nivelul descărcărilor parţiale. Conform standardelor aflate în vigoare, sarcina aparentă determinată în cadrul acestor încercări trebuie să fie de maxim 5 pC.

În cazul cablurilor cu izolație hârtie-ulei, probele de străpungere se pot fi efectuate atât cu tensiune alternativă cât și cu tensiune continuă. Valorile tensiunilor de încercare se stabilesc în funcție de tensiunea nominală a cablului cu ajutorul următoarelor relații:

- pentru probele cu tensiune alternativă $U_{inc\ ca} = 2U_0 + 10$ [kV], dacă tensiunea nominală a cablului este mai mică de 87 kV, respectiv $U_{inc\ ca} = 1{,}67U_n + 10$ [kV] pentru $U_0 > 87$ kV;
- pentru probele cu tensiune continuă, $U_{inc\ cc} = 2\ U_{inc\ ca}$.

Pe lângă aceste încercări se măsoară factorul de pierderi dielectrice și capacitatea electrică la U_0 și 2 U_0 pentru cablurile cu $U_0 \leq 87$ kV, respectiv la U_0 și 1,67 U_0 pentru cablurile cu $U_0 > 87$ kV.

6.5.1.2. Încercări de tip

Încercările de tip la care sunt supuse izolațiile cablurilor de energie au ca scop verificarea condițiilor tehnice impuse prin standarde și norme. În urma acestor încercări de tip sunt elaborate buletinele și procesele verbale de omologare.

Pentru cablurile cu izolație polimerică extrudată, de medie tensiune, prescripțiile tehnice aflate în vigoare impun efectuarea următoarelor măsurători [3]:

- măsurarea rezistenței de izolație la temperatura ambiantă;
- măsurarea nivelului descărcărilor parțiale;
- încercarea la îndoire urmată de măsurarea nivelului descărcărilor parțiale;
- măsurarea factorului de pierderi dielectrice și a capacității în funcție de tensiune (la $0{,}5U_0$ și 2 U_0);
- măsurarea factorului de pierderi în funcție de temperatura cablului;
- măsurarea rezistenței de izolație la temperatura de serviciu;
- încercări cu impulsuri de tensiune de trăsnet și cu unde de supratensiune atmosferică;
- verificarea izolației cu tensiune alternativă mărită cu valoarea de 3 U_0 timp de 4 ore.

Pentru cablurile cu izolație hârtie – ulei, încercările de tip cuprind

următoarele probe:

- verificarea izolaţiei la tensiune alternativă mărită (2,5 U_0 pentru cablurile cu $U_0 \leq 87\,\text{kV}$, respectiv 1,73 U_0 pentru cablurile cu $U_0 > 87\,\text{kV}$) timp de 24 de ore;
- încercarea cu impulsuri de tensiune de trăsnet după efectuarea probei de îndoire;
- ridicarea curbei tgδ (T) la tensiunea de încercare egală cu tensiunea nominală U_0, la temperatura ambiantă, la temperatura de regim nominal $+5\,^{\circ}\text{C}$, la $40-60\,^{\circ}\text{C}$, în timpul răciri şi imediat după răcire la temperatura ambiantă.

6.5.2. Diagnosticarea stărilor izolaţiilor cablurilor de energie aflate în exploatare

Măsurătorile în urma cărora sunt determinate stările izolaţiilor cablurilor de energie vizează determinarea rezistenţei de izolaţie, încercări la tensiune mărită continuă şi alternativă, determinarea factorului de pierderi dielectrice şi a capacităţii, etc.

6.5.2.1. Măsurarea rezistenţei de izolaţie

Depistarea unor defecte severe situate pe linie, cum ar fi scurtcircuite între conductoare, terminale murdare, etc. pot fi evidenţiate prin măsurarea rezistenţei de izolaţie. Pentru aceste măsurători sunt utilizate megohmmetre cu tensiuni cuprinse între 2500 şi 5000 V. Trebuie menţionat faptul că valoarea rezistenţei de izolaţie este foarte mult influenţată de starea terminalelor. Prin urmare, înainte de efectuarea măsurătorilor, terminalele cablurilor trebuie curăţate cu grijă.

Datorită faptului că liniile electrice subterane au capacităţi electrice foarte mari, intensitatea curentului electric măsurată după un minut de la aplicarea tensiunii nu corespunde în totalitate fenomenului de conducţie ci este o valoare intermediară a curentului de absorbţie. Din acest motiv, în cele mai multe situaţii, valoarea rezistenţei de izolaţie reflectă numai într-o măsură mică starea gradul de degradare a izolaţiei principale a cablurilor. În

tabelul 6.7 sunt prezentate câteva valori orientative ale rezistenței de izolație a cablurilor de energie. Mai utilă pentru evaluarea gradului de degradare a izolației este curba de variație în timp a rezistenței R_{iz}. În fig. 6.8 este prezentată o astfel de curbă de variație a rezistenței de izolație în funcție de durata de exploatare.

Tabelul 6.7. Valorile rezistenței de izolație pe unitatea de lungime a unor cabluri de energie [28].

Tipul cablului	$R_{iz\ 1km}$ [MΩkm]
Cabluri de joasă tensiune	0,5
Cabluri cu izolație din PE și $U_0 = 20\,\text{kV}$	500
Cabluri cu izolație hârtie-ulei și $U_0 = 6-35\,\text{kV}$	100

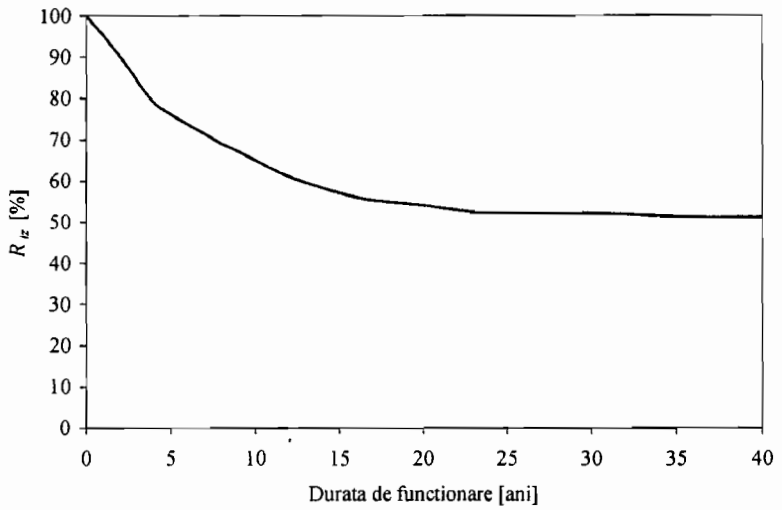


Fig. 6.8. Curba de variație a rezistenței de izolație a unui cablu de energie în funcție de durata de exploatare [28].

6.5.2.2. Încercarea cu tensiune mărită

Izolațiile cablurilor de energie este încercată cu tensiune continuă sau alternativă mărită care se aplică între fiecare conductor și celelalte conductoare conectate la pământ împreună cu ecranul metalic. Tensiunea de

încercare depinde de tensiunea nominală a cablului și de tipul izolației.

La încercările cu tensiune continuă mărită se măsoară curentul de conducție corespunzător fiecărei faze și se determină intensitatea curentului corespunzător unității de lungime a cablului cu ajutorul relației:

$$I_{c\,1km} = \frac{I_c}{L}, \tag{6.13}$$

în care I_c este intensitatea curentului corespunzător întregii lungimi măsurată în microamperi și L reprezintă lungimea totală a tronsonului de cablu măsurată în kilometrii. După efectuarea măsurătorilor pentru fiecare fază în parte, se calculează factorul de simetrie a curentului de conducție a_I cu ajutorul expresiei [28]:

$$a_I = \frac{I_{c\max} - I_{c\min}}{I_{c\min}}. \tag{6.14}$$

În cazul cablurilor a căror izolație se găsește în stare bună, intensitatea curentului de conducție nu trebuie să prezinte variații mari între faze și, prin urmare $a_I \leq 2$. Dacă se constată că există un dezechilibru important între curenții de conducție corespunzători fazelor (factorul de simetrie a_I are valori mari), se ridică curba $I_c\left(U_{inc\,cc}\right)$, tensiunea de încercare crescându-se din 2 în 2 kV. În cazul izolațiilor aflate în stare bună, variația $I_c\left(U_{inc\,cc}\right)$ este practic liniară.

6.5.2.3. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice

Măsurarea factorului de pierderi dielectrice tgδ la cablurile de energie se face cu puntea *Schering* la tensiunile de încercare 0,5 U_0, U_0, 1,25 U_0 și 2 U_0, la temperaturi cuprinse între 15 și 30 °C. La cablurile cu câmp radial, tensiunea de încercare se aplică între fiecare conductor și mantaua sau ecranul corespunzător fazei respective, în timp ce la cablurile cu câmp neradial, tensiunea se aplică între fiecare conductor și ecranul sau mantaua comună. La cablurile cu izolație din PCV, factorul de pierderi dielectrice măsurat la tensiunea nominală (între conductor și ecran) U_0 nu trebuie să depășească 0,9 %, iar la cablurile cu izolație din PE, acesta

trebuie să fie de maxim 0.2 %. În unele situaţii se trasează o curbă de variaţie a factorului de pierderi dielectrice cu temperatura.

6.5.2.4. Localizarea defectelor liniilor electrice subterane

Principalele tipuri de defecte care pot să apară în cazul liniilor electrice subterane (LES) sunt următoarele:

- perforarea sau conturnarea netă a izolaţiei şi apariţia unui canal de arc cu rezistenţa electrică mică (scurtcircuit);
- străpungerea izolaţiei şi apariţia unui canal de străpungere cu rezistenţa electrică mare (defect rezistiv);
- perforarea sau conturnarea trecătoare a izolaţiei şi apariţia unui canal de arc electric cu rezistenţa electrică foarte mare;
- deteriorarea mantalei exterioare a cablului;
- întreruperea căii de curent datorită unor intervenţii brutale asupra cablului.

Primele patru categorii de defecte sunt datorate procesului de degradare a izolaţiei şi se numesc *defecte transversale*, în timp ce întreruperea căilor de curent constituie un *defect longitudinal.*

Pentru localizarea defectelor tronsoanelor de cablu au fost şi sunt utilizate diverse tehnici. În cadrul primelor încercări de localizare a defectelor transversale s-au folosit punţi de măsură de curent continuu. Precizia rezultatelor obţinute cu aceste dispozitive depinde foarte mult de rezistenţa canalului de străpungere (o precizie bună necesită o rezistenţă cât mai mică). Prin urmare, în faza premergătoare măsurătorilor, cablul avariat se alimentează cu tensiuni suficient de mari şi curenţi foarte intenşi în vederea încălzirii (arderii) locului de defect şi reducerea rezistenţei canalului de străpungere.

O altă metodă utilizată este *defectoscopia inductivă,* care se bazează pe sesizarea variaţiei câmpului magnetic datorată defectului. Pentru aceasta cablul se alimentează cu ajutorul unui generator de joasă frecvenţă în timp ce un receptor inductiv, acordat la aceeaşi frecvenţă cu cea a semnalului de alimentare, se deplasează în lungul traseului de cablu. Începând de la o anumită distanţă faţă de defect, inducţia câmpului magnetic începe să scadă

pentru ca în dreptul defectului să se anuleze.

Metodele de *defectoscopie ecometrică* sunt cele mai precise şi ca urmare şi cele mai des utilizate. Acestea se bazează pe răspunsul dat de la locul defectului la impulsuri de tensiune relativ joase trimise pe linia electrică subterană cu ajutorul unor dispozitive speciale numite locatoare de defect. Precizia acestor echipamente poate fi extrem de bună ($\pm 0{,}1\%$) dar uneori este afectată de anomaliile LES ca de exemplu prezenţa pe aceeaşi linie a mai multor tipuri de tronsoane de cablu, prezenţa manşoanelor, a derivaţiilor, etc. Prezenţa acestor anomali aproape de locul de amplasare a locatorului de defect conduce la obţinerea unor semnale net superioare în raport cu undele reflectate de defect.

La cablurile cu izolaţie din polietilenă, rezultate mai bune în ceea ce priveşte localizarea defectelor, sunt obţinute prin *metoda oscilaţiilor de relaxare*. În cazul acestor cabluri, străpungerea izolaţiei conduce la formarea unui canal de străpungere a cărui rezistenţă electrică este foarte mare (de până la 5 MΩ). În această situaţie, fenomenul de străpungere se produce numai la tensiuni înalte, de câţiva kilovolţi. Din acest motiv, pentru delimitarea zonei de defect sunt folosite tensiuni înalte redresate sau impulsuri de curenţi intenşi care sunt reflectate în momentul declanşării defectului. Echipamentele de specialitate utilizate în prezent permit prelucrarea undelor reflectate şi indicarea cu precizie a locului defectului.

Bibliografie

1. **A. Ifrim, P. Noţingher**, *Materiale electrotehnice*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1992.

2. **P. V. Noţingher**, *Materiale pentru electrotehnică*, Editura Politehnica Press, Bucureşti, 2005.

3. **T. Horvath, E. Nemeth, B. Mathe** şi **V. Stanciu**, *Încercarea izolaţiei electrice*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1982.

4. STAS 6247-1960.

5. Norme Internationale CEI 60085 Isolation électrique – Classification thermique, IEC 2004.

6. **C. Bălă**, *Maşini electrice*, Ediţia a-II-a, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1982.

7. **H.P. Moser, V. Dahinden**, *Transformerboard* II, Second Edition, Graphics DOK MAN, Zurich, 1999.

8. **I. Cioc** şi **C. Nica**, *Proiectarea maşinilor electrice*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1994.

9. http://www2.dupont.com/Nomex/en_US

10. **I.S. Gheorghiu, Al. Fransua**, *Tratat de maşini electrice, Volumul al-IV-lea Maşina sincronă*, Editura Academiei Române, Bucureşti, 1972, pp. 32-50.

11. Cigre Study Committee SC 11, EG 11.02 Hydrogenerator failures – results of the survey, 2003.

12. **G.C. Stone, E.A. Boutler, I. Culbert, H. Dhirani**, *Electrical insulation for rotating machines*, IEEE Press, Jhon Wiley &Sons, INC. Publication, 2004.

13. **P. V. Noţingher,** *Sisteme de izolaţie*, Editura Printech, Bucureşti, 2002.

14. **M. Laffoon, C.F. Hil, G.L. Moses** and **L.J. Berberich**, „A New High Voltage Insulation for Turbine-Generator Stator Windings", *AIEE Trans., 70, Part. I*, pp. 721-730, 1951.

15. **R.E. Draper** and **B.J. Moore**, „Development of a Vertical Generator Stator Bar Insulation System for Operation at a Increased Stress", *Procc. of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding, IEEE Publication* No 97CH37035, pp. 597-602, 1997.

16. **W. Mertens, H Meyer** and **A. Wichmann**, „Micalastic-Insulation Experience and Progress, *Procc. of the Seventh Electrical Conference, IEEE Publication* No. 32C79, pp. 103-106, 1967.

17. **R. Bartnikas** and **K.D. Srivastava**, *Power and comunication cables*, IEEE Press Series, McGraw-Hill, 1999.

18. **L. Heinold**, *Power cables and their applications*, Ed. Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1990.

19. ABB Power Technoligies AB, *Brochure of High Voltage Cables*, 2GM5001, 2GM5007, 2GM5011, 2GM5012, 2006.

20. EximProd Grup Buzău, Catalog de produse, 2004.

21. http://www.abb.com/product/us

22. **P.V. Notingher, C. Stancu, L.M. Dumitran, P.P. Notingher, A. Rakowska, K. Siodla**, „Influence of the Ageing State of Insulation Systems on Absorbtion/Resorption Currents", *Revue Roumaine des Science Techniques, Serie Electrotechnique et Energetique*, Tome 53, 2, Avril-Juin, 2008, pp. 163-177.

23. **E. Bădărău & I. Popescu**, *Gaze Ionizate. Descarcari electrice în gaze*. Editura Tehnica, Bucuresti, 1965.

24. **L.M. Dumitran**, *Collection des fines particules dans un depoussiereur electrostatique*, These de doctorat de l'Universite Joseph Fourier-Grenoble 1 et l'Universite Politehnica Bucarest, 2001.

25. **L. Dumitrescu**, *Studiul mecanismelor de generare a strimerilor de polaritate pozitivă în lichide*, Teză de doctorat UPB-UJF, Bucureşti, 2001.

26. Norme Internationale CEI 60243 – *Rigidité diélectrique des matériaux isolants- Méthodes d'essai*, Deuxième Edition 1998.

27. **F.H. Kreuger**, *Discharge Detection in High Voltage Equipement*, Elsevier, New York, 1965.

28. **D. Zlatanovici**, *Determinarea stării izolației echipamentului electric*, Editura ICEMENERG, Bucureşti, 2003.

29. **I. Radu**, *Comportarea unor materiale electroizolante în câmpuri electrice intense*, Teză de doctorat Universitatea "Politehnica" Bucureşti, 1997.

30. **X. Zheng** and **G. Chen**, „Propagation Mechanism of Electrical Tree in XLPE CAble Insulation by investigating a Double Electrical Tree Structure", *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, 3, June 2008, pp. 800-807.

31. **O. Visata**, *Influence des arborescences d'eau sur les propriétés diélectriques des polymères*, Thèse Université « Politehnica » Bucarest - Université « Joseph Fourier » Grenoble, 2001.

32. **C. Stancu**, *Caractérisation de l'état de vieillissement des isolations polymères par la mesure d'arborescences et de la charge d'espace*, Thèse en cotutelle Université Montpellier II – Université « Politehnica » Bucarest, 2008.

33. **P.V. Noţingher**, I. Radu, J.C. Filippini, "Electrical Field Calculation in Polymers in the Presence of Water-Tree", *Proc., of 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Leicester, July 10-13, 1995, pp. 666-6.

34. **A.T. Bulinski, S.S. Bamji, R.J. Densley**, "The Effect of Frequency and Temperature on Water Tree Degradation of Miniature XLPE Cables", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol. 21, 4, pp. 645-650, 1986.

35. **D.M. Tu, K.C. Kao**, "Effect of hydrostatic pressure on Water Treeing Properties of Polyetylene", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, p. 307-311, 1983.